



**Universidad
Zaragoza**

Trabajo Fin de Grado

Modelo de toma de decisiones para planificación de
la producción en Celulosa Fabril S.A (CEFA)

Decision-making model for production planning at
Celulosa Fabril S.A (CEFA)

Autor

Alejandro Laguna Amaro

Director

Ignacio Cebollero Allué

Ponente

Ignacio Martínez Ruiz



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, que tanto me han apoyado durante todos estos años, ya que todo lo que he conseguido ha sido gracias a ellos, en especial a mi madre.

También agradecer a mi tutor de TFG y prácticas Ignacio Cebollero Allué por todo lo que me ha enseñado durante estos últimos meses. A Ignacio Martínez Ruiz por su ayuda y apoyo en la realización del trabajo y la memoria. Y a José Manuel Colom por su tiempo y ayuda en la realización del trabajo.

Por último, agradecer a Cefa y a mi club, Alcampo Scorpio 71, por darme la oportunidad de pertenecer a la cátedra Cefa, para poder compaginar mis estudios y mi pasión, el atletismo.

ÍNDICE

| | | |
|------|--|----|
| 1. | INTRODUCCIÓN | 5 |
| 1.1. | Resumen ejecutivo | 6 |
| 1.2. | Descripción del problema..... | 6 |
| 1.3. | Objetivos | 7 |
| 1.4. | Estructura de la memoria | 7 |
| 2. | Análisis y metodología | 8 |
| 2.1. | Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ) | 8 |
| 2.2. | Programación lineal..... | 9 |
| 2.3. | Redes de Petri | 9 |
| 2.4. | Descripción del proceso de inyección | 10 |
| 3. | CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO (EOQ)..... | 13 |
| 3.1. | Resultados..... | 13 |
| 3.2. | Conclusiones | 16 |
| 4. | PROGRAMACIÓN LINEAL..... | 16 |
| 4.1. | Resultados..... | 16 |
| 4.2. | Conclusiones | 18 |
| 5. | Modelado y Análisis de un Sistema de Fabricación usando redes de Petri | 19 |
| 5.1. | Descripción del Sistema de Fabricación..... | 19 |
| 5.2. | Principios del modelado | 23 |
| 5.3. | Construcción del modelo..... | 25 |
| 5.4. | Resultados..... | 27 |
| 6. | Conclusiones..... | 30 |
| 7. | Líneas futuras | 30 |
| 8. | ANEXO I | 33 |
| 9. | ANEXO II | 35 |
| 10. | ANEXO III | 39 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1.Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus Metas [3] | 5 |
| Figura 2. Nivel stock EOQ.[5]..... | 8 |
| Figura 3. Fórmulas EOQ.[5] | 9 |
| Figura 4. Esquema de las herramientas utilizadas en CEFA. | 10 |
| Figura 5. Representación de una máquina inyectora. | 11 |
| Figura 6.Representacion del proceso de inyección en una inyectora. | 11 |
| Figura 7. Representación del sostenimiento en una inyectora..... | 11 |
| Figura 8. Representación del enfriamiento en una inyectora..... | 12 |
| Figura 9. Representación de la expulsión en una inyectora. | 12 |
| Figura 10. Grafica coste anual vs tamaño lote. [11]..... | 14 |
| Figura 11. Evolución teórica del stock en la I46. | 17 |
| Figura 12. Evolución stock inyectora 46..... | 17 |
| Figura 13. Imagen de unas máquinas inyectoras..... | 19 |
| Figura 14. Representación del proceso de producción..... | 19 |
| Figura 15. Imagen de un molde..... | 20 |
| Figura 16. Red de Petri donde se muestran los tipos de construcciones. [18] | 24 |
| Figura 17. Modelo del proceso de producción. | 26 |
| Figura 18. Modelo del proceso de acabado. | 26 |
| Figura 19. Modelo de la composición del modelo de la I46. | 27 |
| Figura 20. Red de Petri de la célula CUATRO. | 28 |
| Figura 21. Red de Petri de la I46 realizada por TINA..... | 29 |
| Figura 22. Grafo de alcanzabilidad de la I46. | 29 |
| Figura 23. Calculo Solver I27. | 38 |
| Figura 24. Clasificación Model Checking Contest, en la categoría "StateSpace" | 39 |

Índice de tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Lotes I46 calculados mediante EOQ. | 14 |
| Tabla 2. EOQ de la célula CUATRO. | 15 |
| Tabla 3. Lotes I46 obtenidos en Solver. | 16 |
| Tabla 4. Maestro de materiales I46..... | 33 |
| Tabla 5. Maestro de materiales I46..... | 33 |
| Tabla 6. Maestro de materiales I46..... | 33 |
| Tabla 7.Maestro de materiales célula CUATRO. | 34 |
| Tabla 8. Calculo Solver I46. | 35 |
| Tabla 9. Calculo Solver I42. | 36 |
| Tabla 10. Calculo Solver I45. | 36 |
| Tabla 11. Calculo Solver I34. | 36 |
| Tabla 12. Calculo Solver I31. | 37 |
| Tabla 13. Calculo Solver I26. | 37 |
| Tabla 14. Calculo Solver I46. | 37 |
| Tabla 15. Calculo Solver I35. | 37 |

1. INTRODUCCIÓN

Celulosa Fabril, S.A. (CEFA), fundada en 1946 por Eduardo Blanchard, es una empresa líder en el desarrollo y producción de componentes para la industria del automóvil basados fundamentalmente en la tecnología de inyección de materiales plásticos [1].

La problemática detectada desde CEFA se encuentra en su planificación, en la empresa se trabaja con una planificación semanal, que es realizada de forma manual.

Por ello, desde la empresa, se quería automatizar, creando una herramienta de decisión que permitiera realizar la programación de forma automática, teniendo en cuenta variación de los recursos disponibles, como pueden ser los trabajadores, los moldes, etc.

La automatización de procesos es la base del desarrollo de la actividad industrial con soporte de sistemas inteligentes y robotizados que logran mejoras respecto a la manufactura manual, es decir, es la base de la Industria 4.0.

Para nuestra herramienta de decisión, se necesita la suficiente inteligencia artificial para emitir una respuesta o solución acorde a la información que ha recibido y las necesidades que surgen en cada momento y lugar.

De esta manera, un sistema automatizado puede variar o corregir su forma de ejecutar una tarea de forma inmediata, evitando productos defectuosos, cuellos de botella o desabastecimiento de materiales.

Si pensamos por ejemplo en la utilidad de la automatización de procesos en la industria del automóvil -una de las más complejas y con altos costes- contar con sistemas que automatizan los procesos operativos y de fabricación implica acortar tiempos, emplear mejor los materiales e intervenir cada pieza con la precisión y exactitud necesaria [2].

En cuanto a los objetivos y metas de desarrollo sostenible que se buscan son:

- Trabajo decente y crecimiento económico.
- Industria, innovación e infraestructura.
- Producción y consumo responsable.



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible y sus Metas [3]

1.1. Resumen ejecutivo

Una de las problemáticas que se ha decidido solucionar desde CEFA es la capacidad de programar la planificación de la producción.

Por ello, desde la empresa, se quería automatizar, creando una herramienta de decisión que permitiera realizar la programación de forma automática, teniendo en cuenta variación de los recursos disponibles, como pueden ser los trabajadores, los moldes, etc.

Primero, se ha calculado los lotes de producción, primero de una inyectora, la I46, y después de toda la célula CUATRO mediante el EOQ.

En particular se trabajará con el modelo de Lote Económico con Producción y Consumo Simultáneo, cuyos principales supuestos son:

- La recepción del inventario es constante durante un periodo de tiempo.
- La producción y demanda es conocida y constante.
- El tiempo de entrega (lead time) se conoce y es constante.
- No existen descuentos por cantidad, sin embargo, dicha condición es factible de flexibilizar al igual que el Modelo de Cantidad Económica de Pedidos (EOQ) con descuentos por cantidad.
- Los dos únicos costos relevantes son el costo de mantener el inventario y el costo de hacer un pedido.

Después, se calcularán los lotes, tanto para la I46 como para toda la célula CUATRO, mediante programación lineal.

Para ello se utilizará la herramienta Solver de Microsoft Excel, la cual nos permite hallar la solución de problemas de programación lineal entera y/o que utilicen variables binarias.

Para ello, se establece una función objetivo, que es la función lineal que deseamos maximizar o minimizar, que en nuestro caso se trata del coste económico, después se realiza la declaración de las variables, y por último se añaden las restricciones de capacidad.

Por último, se ha realizado un modelado y análisis del sistema de fabricación de la célula CUATRO, utilizando redes de Petri.

A través del grafo de alcanzabilidad de la RdP, se podrá saber si el estado, en el que se han fabricado los lotes necesarios son posibles o no.

1.2. Descripción del problema

Una de las problemáticas que se ha decidido solucionar desde CEFA es la capacidad de programar la planificación de la producción.

Actualmente, se reciben los pedidos cada dos semanas, y se realiza la planificación de la producción de forma semanal manualmente, teniendo en cuenta la disponibilidad de los recursos.

Por lo tanto, cada vez que surge un problema, ya sea por la baja inesperada de algún operario, la falta de algún componente, etc., se ha de realizar de nuevo la planificación, y al realizarse de forma manual, es una tarea muy laboriosa.

Por lo tanto, dentro del proceso de digitalización de Cefa, existe una línea de trabajo enfocada a automatizar la planificación por medio de una herramienta. Dicha herramienta ha de realizar una planificación de forma automática teniendo en cuenta una cierta cantidad de variables o recursos:

- Trabajadores.
- Embalaje.
- Disponibilidad de maquinaria.
- Etc.

Así como también tener la capacidad de decidir, según el estado de la fábrica, y sus recursos disponibles en un instante determinado, si los lotes de piezas de fabricación deseados se pueden producir, o en su defecto, que otras piezas se pueden fabricar.

Este TFG se enmarca en esta línea de trabajo.

1.3. Objetivos

Los objetivos que se van a perseguir en este trabajo son:

- El análisis y estudio de la producción de la célula CUATRO. Para ello, se va a trabajar con distintos planteamientos teóricos, como son el Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ) o la programación lineal.
- La introducción de la Redes de Petri. Para ello se estudiará y analizará la célula cuatro y se modelará una red de Petri.
Cuyo objetivo será crear una herramienta de decisión que nos permita saber si se puede fabricar los lotes de piezas deseados.

1.4. Estructura de la memoria

La estructura de la memoria será la siguiente:

En el capítulo 2 se presenta el análisis inicial del trabajo y la metodología que se va a llevar a cabo. En el capítulo 3 se estudia el modelo EOQ aplicado a la inyectora I46, después a toda la célula CUATRO. En el capítulo 4 se aplicará la programación lineal para obtener los lotes de la cantidad económica de pedido, primero en la I46, y después en toda la célula CUATRO. En el capítulo 5, se realizará un análisis y modelado del sistema de fabricación mediante redes de Petri. Por último, en el capítulo 6 se expondrán las conclusiones del trabajo, y en el capítulo 7 se hablará sobre las futuras líneas de trabajo.

2. Análisis y metodología

El primer paso en el desarrollo de este TFG ha sido analizar las distintas alternativas que pueden plantearse para programar la planificación de la producción. Se detallan a continuación tres tipos de planteamientos (modelo EOQ, programación lineal y redes de Petri) que se han llevado a cabo y se describe el moldeo por inyección que es objeto de planificación en el proceso de producción.

2.1. Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ)

El primer planteamiento teórico con el que se va a trabajar es el Modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ), se trata de un modelo fundamental para el control de inventarios.

En particular se trabajará con el modelo de Lote Económico con Producción y Consumo Simultáneo, cuyos principales supuestos son:

- La recepción del inventario es constante durante un periodo de tiempo.
- La producción y demanda es conocida y constante.
- El tiempo de entrega (lead time) se conoce y es constante.
- No existen descuentos por cantidad, sin embargo, dicha condición es factible de flexibilizar al igual que el Modelo de Cantidad Económica de Pedidos (EOQ) con descuentos por cantidad.
- Los dos únicos costos relevantes son el costo de mantener el inventario y el costo de hacer un pedido.

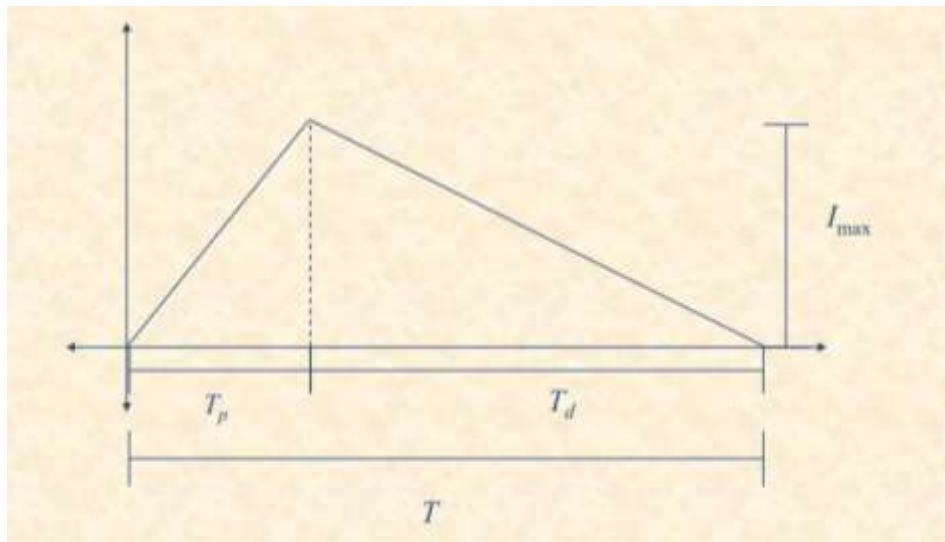


Figura 2. Nivel stock EOQ.[5]

$$T_p = \frac{Q}{P} \quad I_{\max} = T_p(P - D) = Q\left(1 - \frac{D}{P}\right)$$

$$T_d = \frac{I_{\max}}{D} = \frac{Q}{D}\left(1 - \frac{D}{P}\right) \quad T = T_p + T_d = \frac{Q}{D}$$

Total relevant cost per unit time is

$$TRC(Q) = \frac{AD}{Q} + \frac{HQ}{2}\left(1 - \frac{D}{P}\right)$$

Figura 3. Fórmulas EOQ.[5]

2.2. Programación lineal

La programación lineal es el campo de la programación matemática dedicado a maximizar o minimizar (optimizar) una función lineal, denominada función objetivo, de tal forma que las variables de dicha función estén sujetas a una serie de restricciones expresadas mediante un sistema de ecuaciones o inecuaciones también lineales. El método tradicionalmente usado para resolver problemas de programación lineal es el Método Simplex.[6]

Para el trabajo se utilizará la herramienta Solver de Microsoft Excel, la cual nos permite hallar la solución de problemas de programación lineal entera y/o que utilicen variables binarias.

Para ello, se establece una función objetivo, que es la función lineal que deseamos maximizar o minimizar, que en nuestro caso se trata del coste económico, después se realiza la declaración de las variables, y por último se añaden las restricciones de capacidad.

2.3. Redes de Petri

Una red de Petri (Rdp) es una herramienta formal (matemática) para la construcción de modelos de Sistemas de Eventos Discretos (SEDs) [7][8][9]. Se trata de un modelo ejecutable y representación gráfica. Permite modelar fácilmente sistemas concurrentes y distribuidos en los que aparecen relaciones de cooperación y competencia, así como sincronización de acciones. Una red de Petri está formada por lugares, transiciones, arcos y marcas.

El objetivo es utilizar el modelo para determinar si es posible fabricar un determinado número de piezas, cumpliendo con las ordenes de planificación, o de lo contrario ver cuales se pueden fabricar en el lugar de estas.

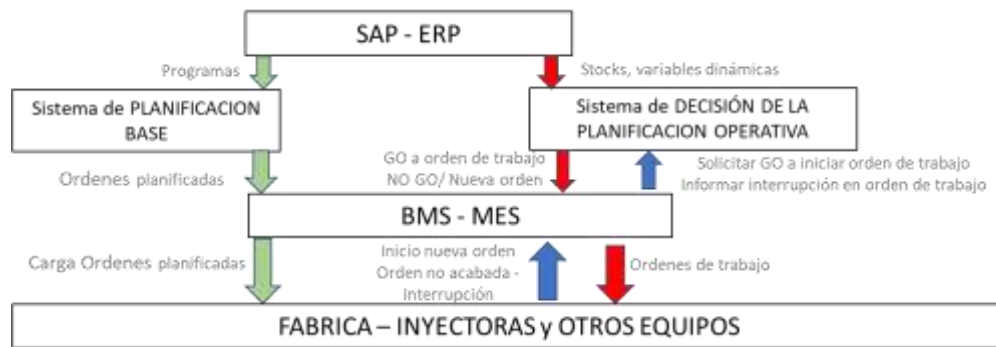


Figura 4. Esquema de las herramientas utilizadas en CEFA.

Se trata de una herramienta que se debe implementar dentro de la empresa CEFA, como se ve en la figura 4.

El sistema recibirá información de una serie de variables del programa de ERP (número de operarios, cantidad de embalaje, etc.) y determinará que piezas pueden producirse. Esta información será enviada al programa BMS, el cual iniciará las ordenes de producción.

Hay que destacar, que en este proceso hay dos herramientas, el planificador base, que se encarga de realizar la planificación, y el decisor, que es la herramienta con la que vamos a trabajar.

Para ello utilizaremos el grafo de alcanzabilidad de la RdP, este es un grafo que muestra todos los estados posibles de la red. Por lo tanto, si aparece el estado en el cual se fabrican los lotes de piezas deseados, se dará el OK para iniciar las ordenes de trabajo, si esto no es así, se buscará que piezas es posible fabricar.

2.4. Descripción del proceso de inyección

El **moldeo por inyección** es un proceso de fabricación para la producción de piezas mediante la inyección de resinas en un molde [10].

Los gránulos de resina se almacenan en una tolva desde la que se alimenta un cilindro (cañón) calentado con un tornillo (husillo) interno que funde y plastifica el polímero por calor y fricción. Desde este cilindro se inyecta la resina a presión en las cavidades de un molde, donde se enfría y se solidifica con la forma de las cavidades del molde. Los moldes pueden ser de una o varias cavidades. Los moldes se hacen de aceros para herramientas, pero también de aceros inoxidables y de aluminio.

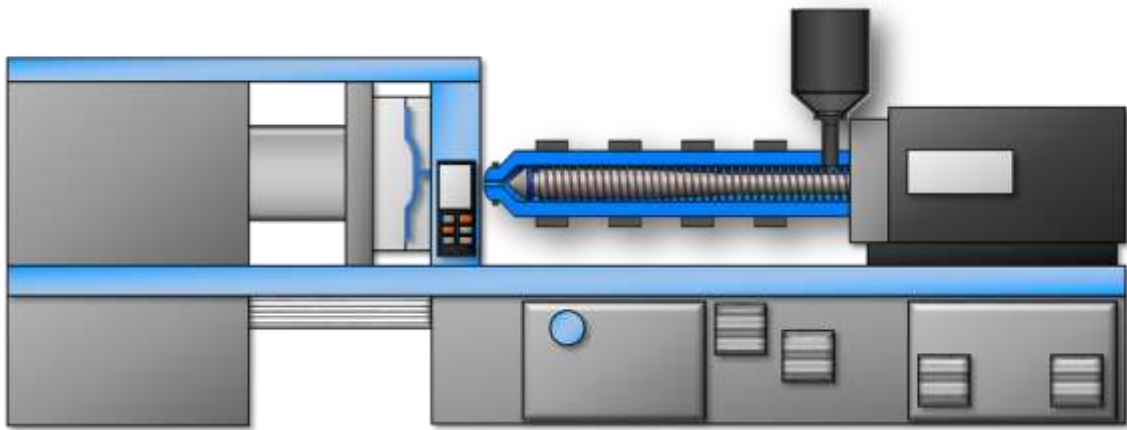


Figura 5. Representación de una máquina inyectora.

El proceso se realiza en las siguientes etapas:

- 1) **Inyección del material.** El tornillo avanza inyectando el material fundido al molde por la boquilla del cañón.

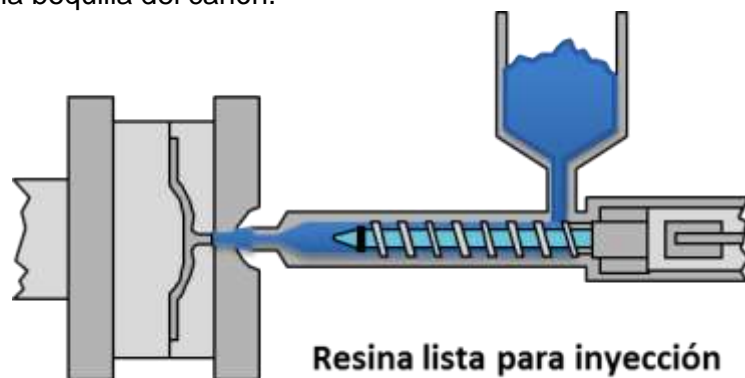


Figura 6. Representación del proceso de inyección en una inyectora.

- 2) **Sostenimiento.** El tornillo al final de su carrera se mantiene en esa posición durante un pequeño tiempo realizando presión sobre la resina dentro del molde mientras se enfría.

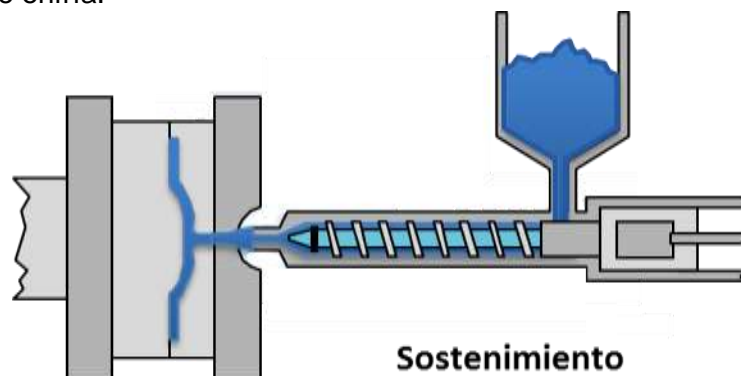


Figura 7. Representación del sostenimiento en una inyectora.

- 3) **Enfriamiento.** El tornillo se retrae en cuanto el punto de inyección del molde se ha solidificado. El material dentro del molde se solidifica antes de abrir el molde.

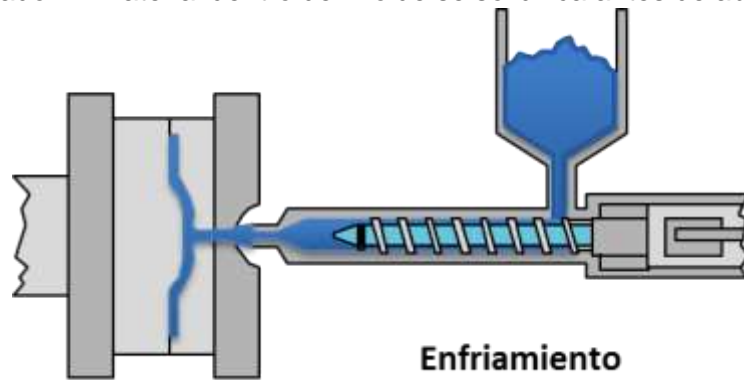


Figura 8. Representación del enfriamiento en una inyectora.

- 4) **Expulsión.** Se abre el molde y las piezas son expulsadas del mismo por acción mecánica.

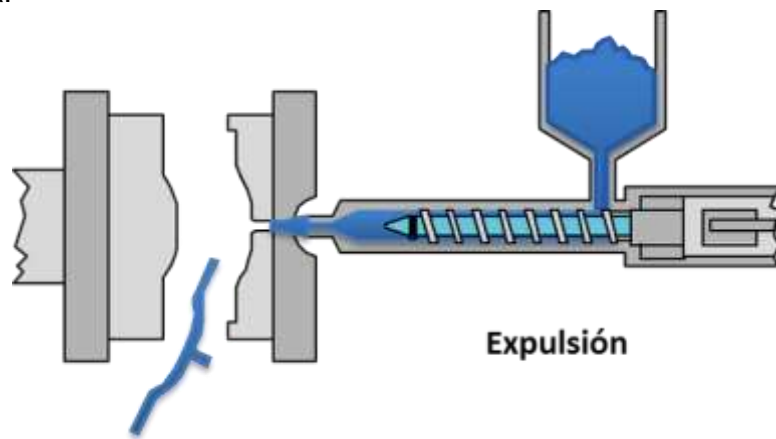


Figura 9. Representación de la expulsión en una inyectora.

- 5) **Cerrado del molde.** Se cierra el molde para comenzar el ciclo con la inyección del material.

3. CANTIDAD ECONÓMICA DE PEDIDO (EOQ)

Como trabajo inicial, se procederá a comparar el planteamiento teórico del EOQ aplicado a una inyectora, que será la I46, que fabrica las piezas 973891 (Pieza 1), 973910 (Pieza 2), 9714046 (Pieza 3) y 9714047 (Pieza 4), con los firmes realizados durante el mismo periodo de tiempo.

- Creación de un Maestro de materiales
- EOQ inicial
- EOQ mediante Solver
- Simulación del stock a través de firmes reales

Primero, para la creación del Maestro de materiales se ha recopilado una serie de datos, nombre de la pieza, molde en el que se fabrica, el número de piezas que se fabrican por hora, etc., sobre las piezas que se fabrican en la inyectora I46 mediante la plataforma de SAP, que se utilizarán para realizar el EOQ. Todo esto se muestra en el Anexo I.

El EOQ es el valor del lote que nos minimiza el coste total, el coste total este compuesto por el coste de inventario (holding) y el coste de producción (set-up), que son inversamente proporcionales, por lo que gráficamente, el punto donde coinciden ambos costes es el coste total más bajo, como se puede apreciar en la figura 10.

A continuación, se ha realizado el cálculo de la cantidad económica de pedido.

3.1. Resultados

Como se ha señalado anteriormente, se trabajará con el modelo de Lote Económico con Producción y Consumo Simultáneo, cuya fórmula del coste es la siguiente:

$$\bullet \text{ Coste Total} = \frac{AD}{Q} + \frac{HQ}{2} \left(1 - \frac{D}{P}\right)$$

De donde se ha despejado Q, para obtener el lote óptimo:

$$Q = \sqrt{\frac{2AD}{H \left(1 - \frac{D}{P}\right)}}$$

D corresponde a la demanda diaria.

P corresponde a la producción diaria.

H corresponde a los costes de holding.

Para el coste de holding, se ha considerado un interés anual del 20%.

A corresponde a los costes de set-up, este valor es una media entre los valores A1 y A2, puesto que el coste es distinto si hay cambio de material en la inyectora o no.

El valor del coste de set-up A1 corresponde al coste si no se cambia de material, y A2 corresponde al coste si se ha cambiado el material cuando se va a fabricar la pieza, ya que si no se cambia de material se desechan 5 piezas al inicio, y si se ha cambiado de material se deben desechar 8 piezas.

Imax corresponde al inventario máximo: $Imax = Q \left(1 - \frac{D}{P}\right)$

Se ha considerado que hay 250 días laborables.

Primero se ha realizado un primer cálculo utilizando los valores de A1 y A2, y finalmente se ha realizado el cálculo utilizando el valor A.

| Referencia | D | P | A1 | A2 | H | Q1 | Q2 | A | Q | Imax |
|------------|-----|------|--------|---------|------|------------|------------|----------|------------|------------|
| 9713891 | 514 | 1464 | 38,061 | 47,5452 | 0,36 | 6460,07229 | 7220,22314 | 39,95784 | 6619,08994 | 4295,17448 |
| 9713910 | 514 | 1464 | 38,025 | 47,43 | 0,37 | 6418,61704 | 7168,58462 | 39,906 | 6575,45716 | 4266,86086 |
| 9714046 | 454 | 1536 | 37,449 | 45,5868 | 0,36 | 5784,81647 | 6382,47358 | 39,07656 | 5909,18565 | 4162,59041 |
| 9714047 | 454 | 1536 | 37,503 | 45,7596 | 0,36 | 5788,10388 | 6393,58468 | 39,15432 | 5914,16116 | 4166,0953 |

Tabla 1. Lotes I46 calculados mediante EOQ.

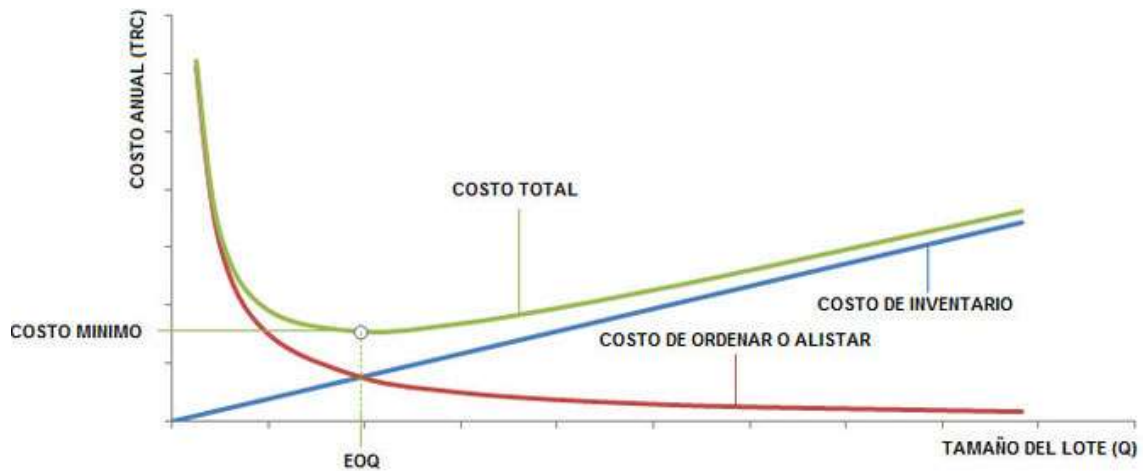


Figura 10. Grafica coste anual vs tamaño lote. [11]

Como se puede comprobar en la tabla 1, el resultado es que, con el primer molde, que fabrica las piezas 9713891 y 9713910, el lote optimo estaría entre las 6619 y las 6575 piezas. Este valor no coincide ya que los valores de A y H variaban un poco.

Lo mismo pasa con las piezas 9714046 y 9714047, su lote optimo estaría entre las 5909 y las 5915 piezas.

De esta manera, se ha obtenido el lote de piezas que se deberían fabricar para obtener el coste mínimo.

También se ha obtenido el valor del inventario máximo que tendríamos para cada pieza.

A continuación, se ha realizado el mismo procedimiento, pero con la célula CUATRO completa:

| Material | D | P | A1 | A2 | A | H | Q | lmax | 2,5 DIAS | SS(0,5 dias) | Cap Max Almacen | Inyectora | |
|----------|---|-------|-------|-----------|------------|------------|-------|------------|------------|--------------|-----------------|-----------|----|
| 9714050 | | 315 | 3936 | 34,821 | 35,4636 | 34,94952 | 0,254 | 4853,52545 | 4465,09544 | 787,5 | 157,5 | sin dato | 45 |
| 9714052 | | 25 | 3936 | 34,803 | 35,4348 | 34,92936 | 0,252 | 1320,48565 | 1312,09842 | 62,5 | 12,5 | sin dato | 45 |
| 9781025 | | 546 | 1920 | 37,08 | 39,078 | 37,4796 | 0,252 | 7532,44163 | 5390,40354 | 1365 | 273 | 1800 | 45 |
| 9781026 | | 546 | 1920 | 37,08 | 39,078 | 37,4796 | 0,264 | 7359,2589 | 5266,46965 | 1365 | 273 | 1800 | 45 |
| 9781027 | | 466 | 1872 | 37,08 | 39,078 | 37,4796 | 0,284 | 6398,47572 | 4805,69276 | 1165 | 233 | 1800 | 45 |
| 9781028 | | 466 | 1872 | 37,08 | 39,078 | 37,4796 | 0,284 | 6398,47572 | 4805,69276 | 1165 | 233 | 1800 | 45 |
| 9780555 | | 200 | 1032 | 33,75 | 33,75 | 33,75 | 1,574 | 1630,84509 | 1314,78984 | 500 | 100 | sin dato | 45 |
| 9784032 | | 228 | 3792 | 34,245 | 34,542 | 34,3044 | 0,258 | 4015,8992 | 3774,4369 | 570 | 114 | 7200 | 34 |
| 9784037 | | 25 | 3264 | 34,245 | 34,542 | 34,3044 | 0,516 | 915,112885 | 908,103749 | 62,5 | 12,5 | 1800 | 34 |
| 9784033 | | 253 | 3792 | 34,245 | 34,542 | 34,3044 | 0,26 | 4228,89971 | 3946,75002 | 632,5 | 126,5 | 7200 | 34 |
| 9784040 | | 270 | 1920 | 33,75 | 33,75 | 33,75 | 0,48 | 3323,47026 | 2856,10725 | 675 | 135 | 1680 | 34 |
| 9784010 | | 25 | 1920 | 33,75 | 33,75 | 33,75 | 0,444 | 981,174872 | 968,399157 | 62,5 | 12,5 | 1344 | 34 |
| 9784024 | | 28 | 1872 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,64 | 893,345759 | 879,983749 | 70 | 14 | 600 | 34 |
| 9784025 | | 4 | 1560 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 1 | 268,438984 | 267,750679 | 10 | 2 | sin dato | 34 |
| 9784042 | | 65 | 3744 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,428 | 1666,46389 | 1637,53222 | 162,5 | 32,5 | 600 | 34 |
| 9784020 | | 40 | 1728 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,424 | 1317,31854 | 1286,82505 | 100 | 20 | 600 | 34 |
| 9784022 | | 113 | 1560 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,928 | 1535,85903 | 1424,6077 | 282,5 | 56,5 | 1200 | 34 |
| 9784043 | | 89 | 3744 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,428 | 1956,39001 | 1909,88394 | 222,5 | 44,5 | 1200 | 34 |
| 9784021 | | 69 | 1728 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,428 | 1737,03842 | 1667,67751 | 172,5 | 34,5 | 1200 | 34 |
| 9784023 | | 132 | 1560 | 35,703 | 36,8748 | 35,93736 | 0,648 | 1999,65809 | 1830,45626 | 330 | 66 | 1200 | 34 |
| 9784034 | | 10 | 1920 | 34,65 | 35,19 | 34,758 | 0,292 | 773,490344 | 769,461749 | 25 | 5 | 660 | 34 |
| 9784035 | | 19 | 1920 | 34,65 | 35,19 | 34,758 | 0,292 | 1068,70372 | 1058,12801 | 47,5 | 9,5 | 1320 | 34 |
| 9784036 | | 30 | 1920 | 34,65 | 35,19 | 34,758 | 0,292 | 1346,79441 | 1325,75075 | 75 | 15 | 1320 | 34 |
| 9784026 | | 469 | 3840 | 34,933644 | 35,6438304 | 35,0756813 | 0,188 | 7059,6276 | 6197,39704 | 1172,5 | 234,5 | 5760 | 34 |
| 9920243 | | 3000 | 3360 | 35,37 | 36,342 | 35,5644 | 0,208 | 48926,0431 | 5242,07605 | 7500 | 1500 | sin dato | 31 |
| 9781033 | | 658 | 4896 | 35,739 | 36,9324 | 35,97768 | 0,41 | 5775,14412 | 4998,99117 | 1645 | 329 | 3600 | 31 |
| 9781044 | | 107 | 4896 | 35,739 | 36,9324 | 35,97768 | 0,426 | 2149,2501 | 2102,27915 | 267,5 | 53,5 | 1800 | 31 |
| 9911162 | | 300 | 2160 | 36,585 | 38,286 | 36,9252 | 0,33 | 4414,89614 | 3801,71612 | 750 | 150 | 468 | 42 |
| 9911163 | | 2000 | 2160 | 36,567 | 38,2572 | 36,90504 | 0,33 | 38855,5226 | 2878,18686 | 5000 | 1000 | 4368 | 42 |
| 9714467 | | 1331 | 2640 | 34,173 | 34,4268 | 34,22376 | 0,092 | 22344,7818 | 11079,2876 | 3327,5 | 665,5 | sin dato | 31 |
| 9714468 | | 1335 | 2640 | 34,173 | 34,4268 | 34,22376 | 0,092 | 22412,6026 | 11078,9569 | 3337,5 | 667,5 | sin dato | 31 |
| 9713887 | | 105 | 1176 | 38,736 | 41,7276 | 39,33432 | 1,804 | 1121,13041 | 1021,02948 | 262,5 | 52,5 | 675 | 42 |
| 9713908 | | 535 | 2160 | 40,23 | 44,118 | 41,0076 | 0,456 | 5654,72958 | 4254,13684 | 1337,5 | 267,5 | 1350 | 42 |
| 9714139 | | 639 | 1848 | 34,9866 | 35,72856 | 35,134992 | 0,17 | 10046,5912 | 6572,68875 | 1597,5 | 319,5 | 5040 | 42 |
| 9714138 | | 640 | 1848 | 34,9866 | 35,72856 | 35,134992 | 0,174 | 9942,32169 | 6499,0934 | 1600 | 320 | 5040 | 42 |
| 9714345 | | 535 | 1392 | 35,19 | 36,054 | 35,3628 | 0,15 | 10120,8921 | 6231,03771 | 1337,5 | 267,5 | 2496 | 42 |
| 9714346 | | 535 | 1392 | 35,19 | 36,054 | 35,3628 | 0,15 | 10120,8921 | 6231,03771 | 1337,5 | 267,5 | 2496 | 42 |
| 9714023 | | 514 | 1392 | 34,074 | 34,2684 | 34,11288 | 0,094 | 12160,0172 | 7669,89588 | 1285 | 257 | sin dato | 42 |
| 9714022 | | 523 | 1392 | 33,822 | 33,8652 | 33,83064 | 0,086 | 12836,6428 | 8013,68004 | 1307,5 | 261,5 | sin dato | 42 |
| 9930029 | | 200 | 840 | 33,75 | 33,75 | 33,75 | 0 | 0 | 0 | 500 | 100 | sin dato | 26 |
| 9713893 | | 541 | 2400 | 33,903 | 33,9948 | 33,92136 | 0,084 | 11875,3535 | 9198,45088 | 1352,5 | 270,5 | sin dato | 26 |
| 9713895 | | 493 | 2400 | 34,443 | 34,8588 | 34,52616 | 0,118 | 9527,34456 | 7570,2692 | 1232,5 | 246,5 | 2835 | 26 |
| 9713914 | | 118 | 2160 | 33,903 | 33,9948 | 33,92136 | 0,094 | 4745,67195 | 4486,41765 | 295 | 59 | sin dato | 26 |
| 9713912 | | 116 | 2160 | 34,443 | 34,8588 | 34,52616 | 0,13 | 4034,62235 | 3817,94819 | 290 | 58 | 756 | 26 |
| 9714286 | | 24 | 2520 | 34,83 | 35,478 | 34,9596 | 0,444 | 976,698105 | 967,396219 | 60 | 12 | sin dato | 26 |
| 9714285 | | 1 | 2280 | 34,83 | 35,478 | 34,9596 | 0,55 | 178,312646 | 178,234439 | 2,5 | 0,5 | sin dato | 26 |
| 9714058 | | 419 | 2400 | 34,443 | 34,8588 | 34,52616 | 0,116 | 8691,61622 | 7174,20489 | 1047,5 | 209,5 | sin dato | 26 |
| 9714060 | | 432 | 2400 | 34,839 | 35,4924 | 34,96968 | 0,118 | 8835,37068 | 7245,00396 | 1080 | 216 | 4480 | 26 |
| 9714149 | | 518 | 4320 | 34,2 | 34,47 | 34,254 | 0,088 | 10702,8641 | 9419,51139 | 1295 | 259 | sin dato | 26 |
| 9714054 | | 105 | 2160 | 34,587 | 35,0892 | 34,68744 | 0,464 | 2031,08336 | 1932,35014 | 262,5 | 52,5 | sin dato | 35 |
| 9714056 | | 25 | 2160 | 34,587 | 35,0892 | 34,68744 | 0,516 | 922,028226 | 911,356603 | 62,5 | 12,5 | sin dato | 28 |
| 9713891 | | 640 | 1464 | 38,061 | 40,6476 | 38,57832 | 0,362 | 7783,93664 | 4381,12281 | 1600 | 320 | 1920 | 46 |
| 9713910 | | 640 | 1464 | 38,025 | 40,59 | 38,538 | 0,366 | 7737,23816 | 4354,83897 | 1600 | 320 | 960 | 46 |
| 9714046 | | 535 | 1536 | 37,449 | 39,6684 | 37,89288 | 0,36 | 6573,0664 | 4283,61944 | 1337,5 | 267,5 | 2080 | 46 |
| 9714047 | | 535 | 1536 | 37,503 | 39,7548 | 37,95336 | 0,36 | 6578,30987 | 4287,03657 | 1337,5 | 267,5 | 2080 | 46 |
| 9714469 | | 1352 | 1920 | 33,858 | 33,9228 | 33,87096 | 0,04 | 43987,9327 | 13013,0968 | 3380 | 676 | sin dato | 35 |
| 9714470 | | 1308 | 1920 | 33,858 | 33,9228 | 33,87096 | 0,04 | 41681,9026 | 13286,1065 | 3270 | 654 | sin dato | 35 |
| 9714471 | | 10627 | 15360 | 33,7572 | 33,76152 | 33,758064 | 0,024 | 155740,241 | 47989,4897 | 26567,5 | 5313,5 | sin dato | 35 |
| 9781039 | | 670 | 2640 | 33,984 | 34,1244 | 34,01208 | 0,044 | 18628,6555 | 13900,9285 | 1675 | 335 | sin dato | 35 |
| 9781038 | | 95 | 1320 | 33,984 | 34,1244 | 34,01208 | 0,036 | 6953,94212 | 6453,46901 | 237,5 | 47,5 | sin dato | 35 |
| 9781041 | | 678 | 2640 | 33,993 | 34,1388 | 34,02216 | 0,046 | 18367,6814 | 13650,5268 | 1695 | 339 | sin dato | 35 |
| 9781040 | | 95 | 1320 | 33,993 | 34,1388 | 34,02216 | 0,034 | 7156,60766 | 6641,54877 | 237,5 | 47,5 | sin dato | 35 |
| 9714473 | | 333 | 1680 | 34,4925 | 34,938 | 34,5816 | 0,116 | 7868,12967 | 6308,55397 | 832,5 | 166,5 | sin dato | 27 |
| 9714475 | | 665 | 1680 | 34,47 | 34,902 | 34,5564 | 0,114 | 12916,0365 | 7803,43875 | 1662,5 | 332,5 | 1260 | 27 |
| 9714477 | | 999 | 3360 | 34,5015 | 34,9524 | 34,59168 | 0,116 | 14559,4921 | 10230,6431 | 2497,5 | 499,5 | 1260 | 27 |
| 9714474 | | 158 | 1680 | 34,4925 | 34,938 | 34,5816 | 0,12 | 5012,94314 | 4541,48778 | 395 | 79 | sin dato | 27 |
| 9714476 | | 173 | 1680 | 34,47 | 34,902 | 34,5564 | 0,118 | 5314,09496 | 4766,86971 | 432,5 | 86,5 | 1260 | 27 |
| 9714478 | | 333 | 3360 | 34,5015 | 34,9524 | 34,59168 | 0,12 | 7299,04013 | 6575,65312 | 832,5 | 166,5 | 1260 | 27 |

Tabla 2. EOQ de la célula CUATRO.

Como se puede observar en la tabla 2, el número de piezas es bastante mayor, y también, que el valor de algunos lotes de un mismo molde no coinciden, ya que, aunque se fabriquen a la vez, su demanda es muy diferente. En estos casos, si la diferencia es muy pequeña, se desecharían las piezas que sobrarán, y si es muy grande, se taponaría la parte del molde que corresponde a la pieza con menor demanda, para que dejase de fabricarse.

Todos estos valores se compararán con los valores obtenidos en la programación lineal, ya que debemos meter restricciones y limitaciones que hay en la fábrica.

3.2. Conclusiones

Calcular los lotes de producción mediante el EOQ no es una herramienta útil debido a la limitación del embalaje. Se ha observado que el Q óptimo va a tender a ser el máximo posible, y es muy superior al embalaje disponible. Además, como se verá a continuación, cuantas más restricciones se añaden, menos óptimo es el lote.

4. PROGRAMACIÓN LINEAL

Como se ha comentado al inicio, utilizaremos la herramienta Solver para calcular, mediante la aproximación lineal, el lote óptimo que minimiza la función objetivo, que será el coste.

$$\bullet \text{ Coste Total} = \frac{AD}{Q} + \frac{HQ}{2} \left(1 - \frac{D}{P}\right)$$

Además, se han añadido una serie de limitaciones, tanto físicas como técnicas, existentes a la hora de producir las piezas.

Las limitaciones que se han introducido son:

Tanto las piezas 1 y 2, y las 3 y 4, como se desmoldan a la vez, han de fabricarse el mismo número de piezas.

La cantidad de piezas del inventario máximo queda delimitada por el número de embalaje de cada pieza.

La producción diaria se ha limitado entre los 2 turnos máximos, y el número mínimo de turnos que hace cumplir la demanda semanal. Cada turno es de 8h.

Se limitan los lotes para que coincidan el montaje de un molde con el desmontaje del otro.

Una vez introducido todo esto en Solver, disponible en el Anexo II, se obtienen los resultados.

4.1. Resultados

A continuación, en la tabla 3, se muestra el número de piezas que se fabricaran por lote de la inyectora I46:

| Referencia | Nº de piezas |
|------------|--------------|
| 9713891 | 2013 |
| 9713910 | 2013 |
| 9714046 | 1681 |
| 9714047 | 1681 |

Tabla 3. Lotes I46 obtenidos en Solver.

Por lo que cada molde estará trabajando durante 16h (los 2 turnos máximos) y estarán descansando otras 16h, ya que trabajarán alternativamente uno después del otro, como se puede ver en la figura 11. De tal forma, la inyectora puede estar produciendo las cuatro piezas sin parar.

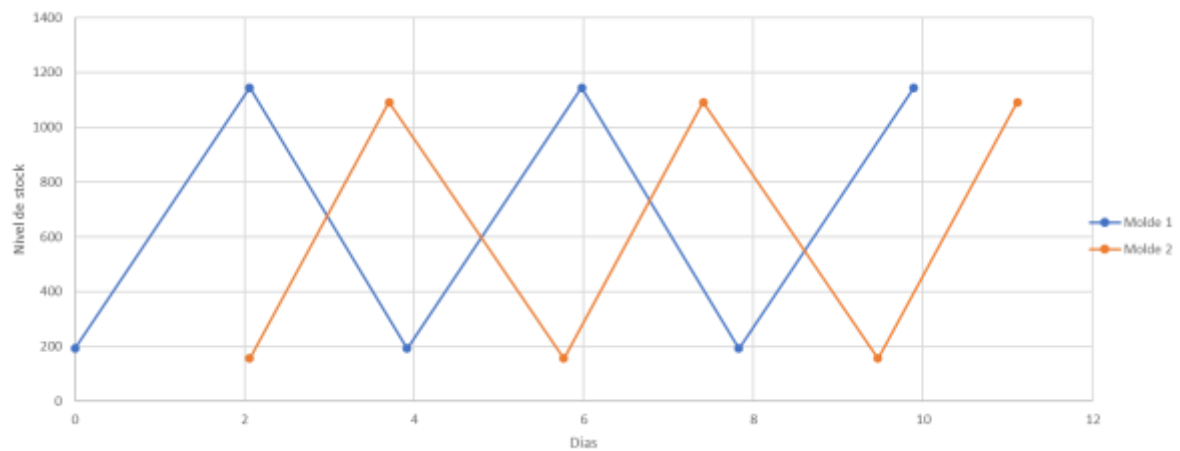


Figura 11. Evolución teórica del stock en la I46.

Además, también se ha simulado la evolución del stock de cada pieza, figura12, atendiendo a la demanda real durante 15 días.

Como se puede observar, al principio las piezas 9713891, 9713910 y 9714046, sufren rotura por stock, ya que tienen una demanda superior a la media utilizada, y las piezas 9714046 y 9714047 sobrepasan la capacidad del embalaje, ya que tienen una demanda inferior a la utilizada.

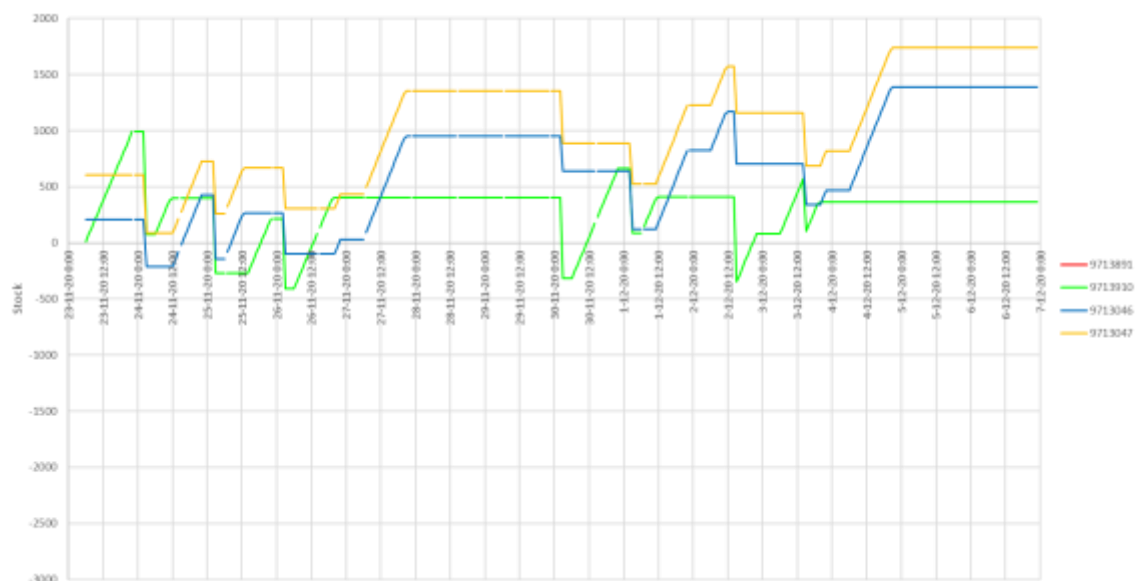


Figura 12. Evolución stock inyectora 46.

A continuación, se ha realizado el mismo procedimiento con toda la célula CUATRO:

Función a optimizar: Coste Total = $\frac{AD}{Q} + \frac{HQ}{2} \left(1 - \frac{D}{P}\right)$

Variables:

- Coste de set-up (A)
- Coste de holding (H)
- Demanda semanal (D)
- Producción semanal (P)
- Lote fabricado (Q)

Restricciones:

- Los lotes de las piezas que se fabrican con el mismo molde a la vez han de ser idénticos
- El inventario máximo de cada pieza está determinado por su embalaje
- Los tiempos de descanso de cada molde de una misma inyectora han de ser superior o igual a los tiempos de producción del resto de los moldes.

4.2. Conclusiones

Aunque para el estudio de una sola inyectora el uso de la programación lineal podría ser útil, a la hora de aplicarlo para un número mayor surgen complicaciones, debido al aumento de piezas a fabricar, y al gran número de limitaciones que se añaden. Además, debido a esto último, hace que la capacidad de potencia que tiene Solver no sea suficiente para realizar los cálculos. Debido a esto, no era posible encontrar una solución óptima mediante programación lineal.

5. Modelado y Análisis de un Sistema de Fabricación usando redes de Petri

5.1. Descripción del Sistema de Fabricación

El sistema de fabricación objeto de este proyecto es una celda de fabricación de piezas de material plástico, mediante moldeo por inyección.



Figura 13. Imagen de unas máquinas inyectoras.

La celda de trabajo consta de 8 máquinas de inyección distribuidas en planta como se indica en la figura siguiente. Adicionalmente, en la distribución en planta se aprecian a la salida de cada máquina de inyección un poke-yoke para el validado de cada una de las piezas desmoldadas, y a la salida de cada uno de éstos un operario embala. La alimentación de granza en las máquinas de inyección viene automáticamente desde los silos y el suministro de embalajes a las máquinas lo realizan los carretilleros. Para simplificar el modelo, solo se tendrá en cuenta a un operario por inyectora para el poka-yoke y embalar.

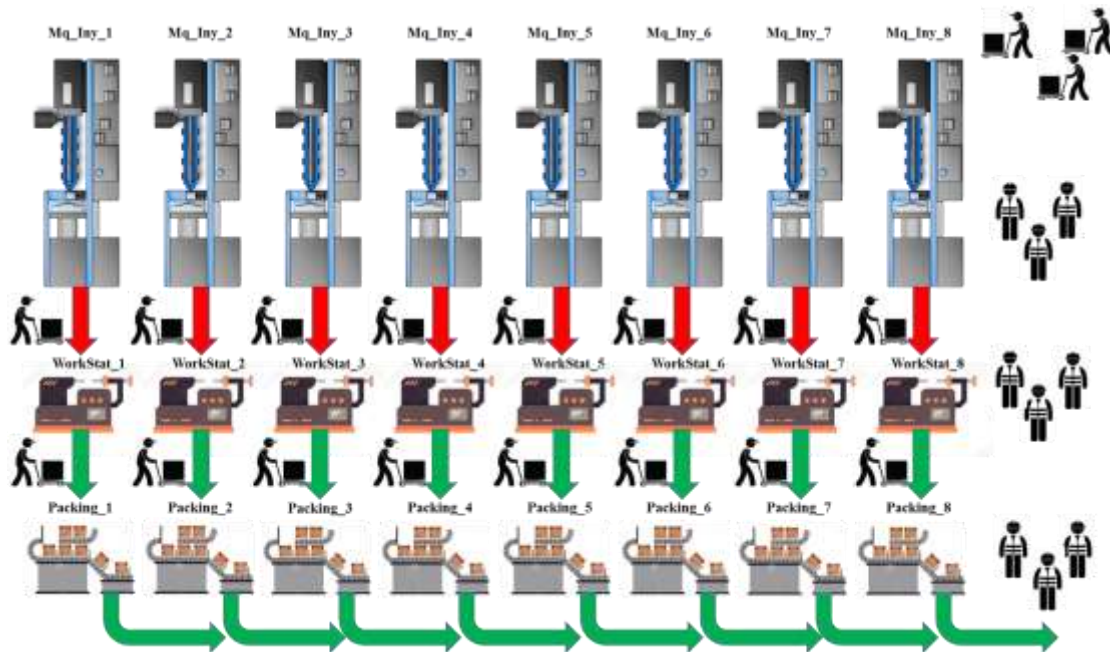


Figura 14. Representación del proceso de producción.

Cada máquina de inyección (Mq_Iny_i) trabaja con una serie de moldes y cada uno de los moldes es capaz de realizar una serie de piezas en cada ciclo de inyección que dependen de las cavidades existentes en el molde. Por ejemplo, la **“máquina de inyección 46”** trabaja con 2 tipos de moldes (molde A y molde B) los cuales realizan dos piezas cada uno (Molde A: Pieza 1 y Pieza 2; Molde B: Pieza 3 y Pieza 4) estas piezas se realizan a la vez, es decir, cada vez que se abra el molde A, se desmolda una Pieza 1 y una Pieza 2. La figura siguiente ilustra uno de los moldes utilizados en la planta.

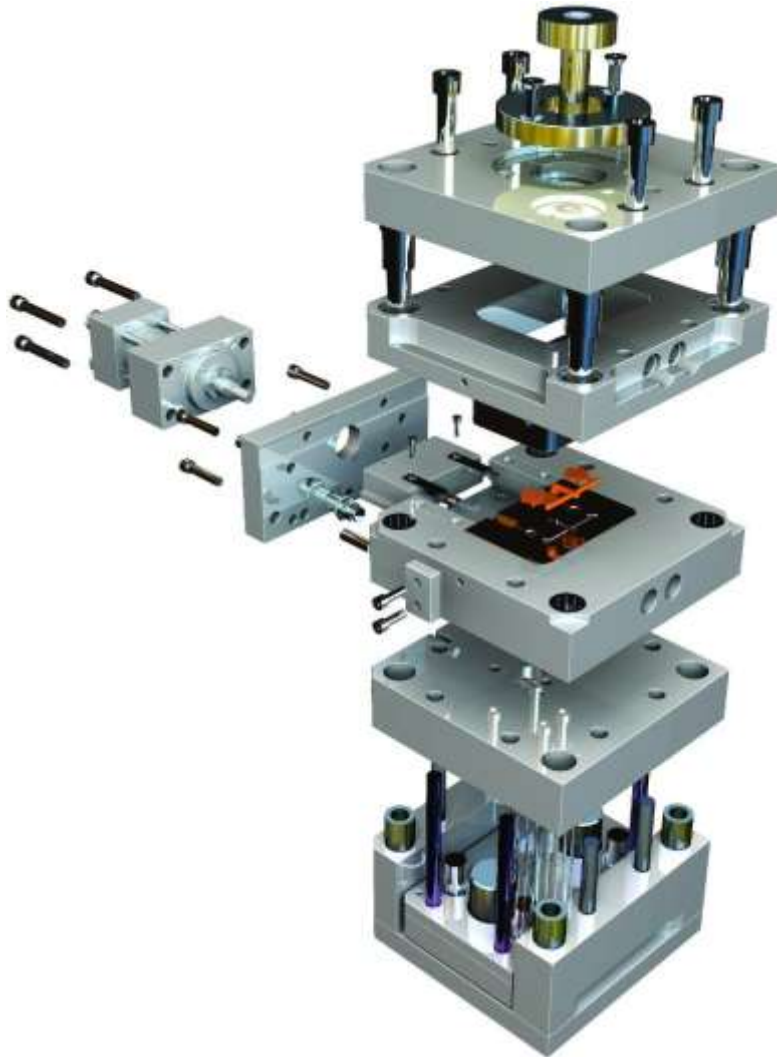


Figura 15. Imagen de un molde.

El **proceso de fabricación de Piezas de tipo X por moldeado de inyección en una máquina de inyección** es el siguiente:

- **Tarea de selección de la máquina de inyección en la que realizar la fabricación de las piezas de tipo X.**
- **Tarea de instalación inicial de un molde para fabricar Piezas de tipo X.** Colocación de un molde en la máquina de inyección. Se trata de una operación realizada por los operarios de la planta mediante el uso de una grúa. Esta tarea tiene una duración de 45 minutos.

- **Tarea de fabricación de un lote.** Esta tarea corresponde a un ciclo de producción de piezas que se pueden fabricar con el molde instalado. Las operaciones a realizar son: (a) Inyección del material en el molde; (b) Sostenimiento de la presión a la entrada del molde; (c) Enfriamiento de la pieza inyectada en el molde; (d) Expulsión de las piezas moldeadas por apertura del molde; (e) Cierre del molde para iniciar un nuevo ciclo de fabricación de piezas.

Las piezas desmoldadas se depositan en una cinta a la salida de la máquina de inyección, habiendo espacio para **almacenar solo las piezas desmoldadas en el ciclo recién terminado** para que se pueda proceder a moldear la siguiente hornada de piezas. En el caso que no se hayan retirado estas piezas, un nuevo intento de desmoldado se bloqueará haciendo que la máquina de inyección se pare hasta que se retiren. Un operario especializado en el control de calidad, acabado y embalaje se encarga del **proceso de acabado y embalaje de piezas moldeadas** que consiste en las siguientes tareas:

- **Validación de la pieza desmoldada en estación de trabajo (poka-yoke) para su acabado final.** La pieza que tras el desmoldado ha sido colocada en la cinta transportadora es llevada a la estación de trabajo (poka-yoke) donde se valida la pieza.
- **Tarea de embalaje de las piezas acabadas.** Una vez acabada la pieza se introduce en su correspondiente embalaje. El operario requiere que existan disponibles embalajes vacíos para poder realizar la operación y que son suministrados externamente por carretilleros que se encargan de proveer con arreglo a las órdenes de fabricación planificadas.

Desde un punto de vista operativo, la práctica habitual ha llevado a observar que normalmente, sólo 3 ó 4 de las máquinas de inyección llegan a trabajar simultáneamente por turno. Esto es debido a los recursos que necesitan usar de forma exclusiva las máquinas de inyección y que por la cantidad limitada existente de recursos limita el número de máquinas trabajando concurrentemente. Los recursos limitantes son: los moldes, los operarios en planta, el embalaje y los componentes.

La operación de la célula se planifica con un horizonte semanal y se especifica mediante la lista de piezas a producir, las cantidades de las mismas y los horizontes temporales para la finalización de la producción de los lotes de piezas acabadas. Con estos datos se realizan los cálculos de los recursos necesarios para su producción atendiendo a: información histórica, disponibilidades en almacén, gestión de compras de materias primas, y la logística de entrada y salida de productos de la planta.

Por tanto, desde el punto de vista funcional la célula está compuesta por una serie de recursos reutilizables y que pueden ser compartidos por diferentes procesos productivos para su uso exclusivo durante un ciclo de producción. Estos recursos reutilizables son:

- 8 máquinas de inyección.
- X Moldes para fabricar Piezas de Tipo a, b ...
- Y Moldes para fabricar Piezas de Tipo c, d ...
- Embalaje
- Grúa para colocar los moldes
- 8 WorkStations para el acabado de piezas
- Operarios para la operación de las WorkStations y máquinas de embalaje

Los procesos productivos que se desarrollan en la célula son:

- Procesos de fabricación de Piezas de tipo X por moldeo de inyección en una máquina de inyección.
- Procesos de validado y embalaje de piezas moldeadas.

Finalmente, hay dos tipos de elementos adicionales en el sistema que permiten su operación pensando en un horizonte semanal. La disponibilidad y obtención de estos elementos es responsabilidad de un departamento diferente al de producción, y a los efectos de la operación de la celda, estos son datos iniciales que se utilizarán inicialmente para verificar que la consigna de producción es factible con los materiales y consumibles reportados. Estos son:

- Las **órdenes de producción** de cada tipo de pieza con horizonte semanal; y
- Las **cantidades de materias primas y consumibles** disponibles en el almacén, que fundamentalmente son
 - o La **granza** para la fabricación de las piezas, suministrada en envases de Y kilos (al no haber problemas de suministro, se tendrá en cuenta que siempre hay materia prima suficiente).
 - o Los **componentes** que se deben añadir a las piezas.
 - o Los **embalajes** para guardar las piezas acabadas, suministrados en contenedores para Z unidades.

Lo que se construirá a continuación será un modelo operativo del sistema descrito anteriormente, basado en redes de Petri, con el cual se podrá simular la evolución del sistema para realizar la consigna de producción con los recursos, materiales y consumibles disponibles. Al tratarse de un modelo basado en redes de Petri, se podrán utilizar las técnicas de análisis y herramientas software que permiten llevarlas a cabo de forma que podrá obtenerse informaciones antes de analizar el espacio de estados alcanzables por el sistema.

El objetivo es utilizar el modelo para determinar el conjunto de ejecuciones posibles desde el estado inicial hasta el estado en el que se hayan completado todas las órdenes y poder seleccionar entre todas estas ejecuciones aquella o aquellas que satisfagan determinados criterios globales de la planta como:

- Ejecución de tiempo mínimo de fabricación hasta cumplimiento de la consigna.
- Ejecución que garantice un uso balanceado de las máquinas para garantizar un envejecimiento homogéneo de las mismas.
- Ejecución que permita una producción balanceada de los distintos tipos de piezas.
- Otros criterios.

Los modelos iniciales que se construirán serán modelos que contemplarán el funcionamiento nominal previsto. Estos modelos servirán de base para obtener otros modificados que contemplarán la aparición de fallos en el sistema impidiendo el normal funcionamiento y requiriendo la introducción de tareas alternativas que permitan seguir operando al sistema, aunque sea bajo prestaciones degradadas para conseguir completar la consigna de fabricación. Estos modelos contemplarán, por lo tanto, el funcionamiento tolerante a fallos resultantes de un análisis de fallos del sistema que deban ser tolerados por el sistema de control de la fabricación.

Fallos a tener en cuenta son:

- Rotura o indisposición de una máquina de inyección.
- Rotura o indisposición de una Workstation.
- Rotura o indisposición de una máquina embalaje.
- Indisposición de un operario.
- Rotura de un molde.
- Inaccesibilidad de un almacén.
- Otros.

5.2. Principios del modelado

El modelo descriptivo del sistema de fabricación que se pretende construir será una red de Petri que servirá para estudiar su comportamiento y elegir una planificación que satisfaga los criterios de la consigna. Para ello se enriquece el lenguaje tradicional de descripción de una red de Petri con construcciones de alto nivel que permiten declarar sistemas de grandes dimensiones y complejos. En este proyecto se consideran tres construcciones de alto nivel [12][13][14][15][16][17]:

- **Componentes funcionales** que permiten describir mediante una red de Petri una funcionalidad del sistema. La funcionalidad del sistema vendrá dada por los **procesos de producción a implementar sobre el layout** de la celda de fabricación.
- **Recursos del sistema** que serán modelados mediante redes de Petri (en su versión más simple pueden ser lugares de redes de Petri cuyo marcado inicial representa el número de copias disponibles al inicio de la ejecución) y representan entes pasivos adquiridos por los componentes funcionales para poder progresar en su actividad, a cuyo término son liberados. Ejemplos de recursos en nuestro sistema son las distintas clases de máquinas, los moldes, o los operarios. Estos recursos tienen como características que son compartidos, pero de uso exclusivo entre los procesos productivos, y además son reutilizables siguiendo una secuencia de operaciones de solicitud y reserva de la copia de recurso, uso del recurso, y liberación del recurso para su reutilización por otro proceso productivo.
- **Almacenes intermedios** para conexión entre procesos. Son redes de Petri a través de las cuales se representan los mecanismos a través de los que se imponen relaciones de causalidad entre procesos productivos con una lógica de tipo producción-consumo. Un proceso productivo genera un tipo de objeto que deja en un almacén intermedio si hay espacio para ello. En el caso que no hubiera espacio, el proceso productivo se bloquea esperando la aparición de espacio en el almacén para depositar el objeto producido. Un proceso consumidor trata de extraer un objeto del almacén si hay depositado alguno en su interior. En el caso que no hubiera ningún objeto, el proceso consumidor se bloqueará hasta que aparezca un objeto en su interior y pueda retirarlo. La propiedad importante de estos almacenes es que se trata de almacenes de capacidad limitada y por eso imponen estos mecanismos de sincronización entre los procesos productores y consumidores.

La declaración de un sistema estará basada en la declaración de sus procesos productivos y las relaciones entre ellos mediante compartición de recursos y almacenes intermedios. En su nivel más bajo de declaración de cualquiera de estos tres tipos de constructores será necesario especificar una red de Petri mediante sus lugares, transiciones, arcos de conexión entre ellos y el marcado inicial de sus lugares. Esta descripción estará cercana al diseño estructural que haya realizado el diseñador y por tanto con alto significado en términos de los componentes del sistema modelado.

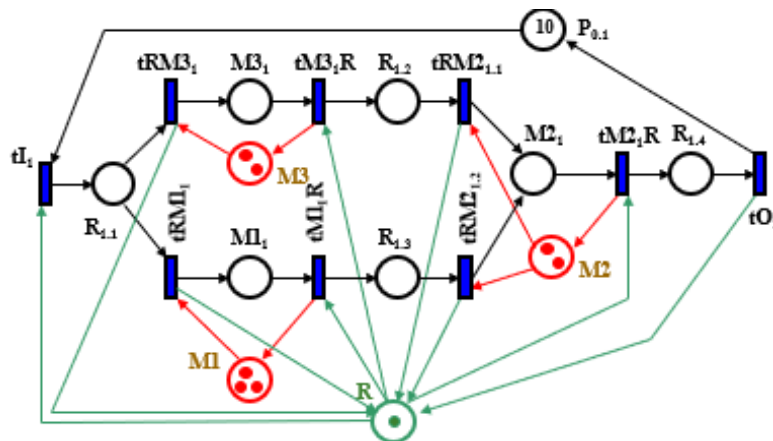


Figura 16. Red de Petri donde se muestran los tipos de construcciones. [18]

Desde un punto de vista técnico, los problemas afrontados para la definición de modelos complejos y gran escala son:

- **Procesos productivos.** Representan una función dentro del sistema. Los procesos que se consideran en este proyecto son **máquinas de estados** (en esencia *autómatas de estados finitos*) que compiten por recursos compartidos y actúan como procesos productores de piezas en distintos estados de producción o consumidores de órdenes de producción o productores de órdenes de producción completadas.
- **Recursos compartidos.** Representan los recursos que necesitan los procesos productivos para realizar su función. El modelado que se considerará aquí será mediante **un lugar** de redes de Petri que representará un tipo de recurso. El *marcado inicial de este recurso representa el número de copias existentes de ese tipo de recurso* y que se encuentran sin usar. Un arco de salida de este lugar recurso, representa una **operación de adquisición** del recurso y un arco de salida de este recurso representa una **operación de liberación** de este recurso.
- **Almacenes intermedios.** Representan la gestión del espacio limitado disponible en un almacén, ya sea de piezas o de órdenes de producción. En redes de Petri, un **almacén de piezas** se modelará mediante **dos lugares**: (1) Lugar **huecos**, que representará el número de espacios libres dentro del almacén; (2) Lugar **objetos**, que representará el número de ítems presentes en el almacén en un instante determinado. La suma de marcas, en cualquier estado alcanzable del sistema, de estos dos lugares se mantiene constante e igual a la capacidad del almacén. Así, por ejemplo, el **almacén de salida de la máquina de inyección** se modela mediante dos lugares: huecos, que inicialmente tendrá una marca, indicando que tiene capacidad libre para alojar una pieza; objetos, que inicialmente estará vacío indicando que no hay ninguna pieza desmoldada pendiente. En este caso la suma de marcas huecos y objetos será siempre igual 1 que es la capacidad máxima del almacén. Con este almacén hay dos operaciones que se pueden realizar: (1) **Operación de producción**: Se retira una marca de huecos y se añade una marca en objetos. Esta operación es atómica, es decir, las dos acciones suceden simultánea e instantáneamente. Por

tanto, si el lugar hueco estuviera vacío la operación de producción no podría realizarse. (2) **Operación de consumo**: Se retira una marca de objetos y se añade una marca en huecos. Igual que la anterior, esta operación es atómica. Por tanto, si el lugar objetos estuviera vacío la operación de consumo no podría realizarse.

En el caso de un almacén de órdenes de producción, se modelará mediante **dos lugares**: (1) Lugar **órdenes_completadas**, que representará el número de órdenes de producción completadas; (2) Lugar **órdenes_programadas**, que representará el número de órdenes que se han planificado como consigna y que todavía no han empezado su actividad. En este caso, el marcado inicial de estos lugares será: 0 marcas en el lugar órdenes completadas (todavía no hay ninguna orden completada) y en el lugar órdenes_programadas n marcas que representarán las n órdenes de producción programadas para producir piezas. Con este almacén hay dos operaciones que se pueden realizar: (1) **Operación de inicio de ejecución de orden**: Se retira una marca de del lugar **órdenes_programadas** y se añade una marca dentro del proceso de producción que ha iniciado las operaciones de producción y esto representa la situación de *orden_en_curso* que irá atravesando distintos estadios (lugares) según progrese la marca por el interior de la red que represente el proceso de producción. Por tanto, si el lugar **órdenes_programadas** estuviera vacío proceso de producción no podría arrancar para fabricar una pieza. (2) **Operación de fin de ejecución de orden**: Se añade una marca al lugar **órdenes_completadas** cuando se retira una marca del último proceso de producción que realiza la última operación para completar la orden de producción. Esta marca del proceso de producción aparece en el estado inicial del proceso de producción dejándolo listo para un nuevo ciclo de actividad. En este caso, y para este tipo de almacenes, el invariante de marcado que aparece es que la suma de marcas de los lugares **órdenes_programadas**, **órdenes_completadas** y las marcas de todos los lugares que representen *órdenes_en_curso* de ese tipo, se mantiene constante e igual al número de órdenes_programadas inicialmente.

5.3. Construcción del modelo

La construcción del modelo completo del sistema se realizará de una manera modular. Es decir, primero se construirá el modelo de cada proceso de producción. En segundo lugar, cada proceso de producción se completará con los lugares que representan los tipos de recursos que utiliza para realizar sus actividades y los lugares de los almacenes con los que interacciona para consumir y/o producir piezas u órdenes de producción. Finalmente, el modelo completo se construye a partir de los procesos de producción con recursos y almacenes, fusionando los lugares de los distintos modelos que representen el mismo recurso o almacén.

5.3.1. Modelo del proceso de producción para la fabricación de pieza X por inyección.

- Máquina de estados del proceso de producción: Se crea el módulo que representa el proceso de producción de una inyectora (zona amarilla de la figura 17).
- Recursos necesarios: Se insertan los recursos que utilizará y compartirá el proceso de producción, molde, grúa, etc.
- Almacenes con los que interacciona: Se añaden los lugares que funcionaran como almacenes intermedios, que será la cinta transportadora.

- Modelo del proceso con recursos y almacenes: Finalmente se añaden los procesos de producción que tienen lugar en la fabricación de la pieza, en el módulo amarillo, y se conecta con los recursos y almacenes.

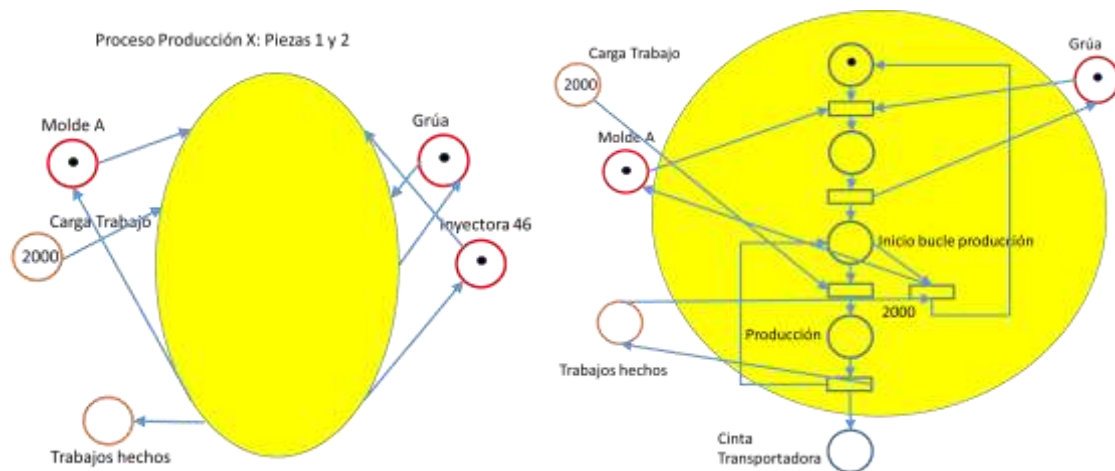


Figura 17. Modelo del proceso de producción.

5.3.2. Modelo del proceso de producción para el acabado de pieza.

Se realiza los procesos anteriores para el modelo del proceso de producción para el acabado de la pieza (figura 18):

- Máquina de estados del proceso de producción.
- Recursos necesarios.
- Almacenes con los que interacciona.
- Modelo del proceso con recursos y almacenes.

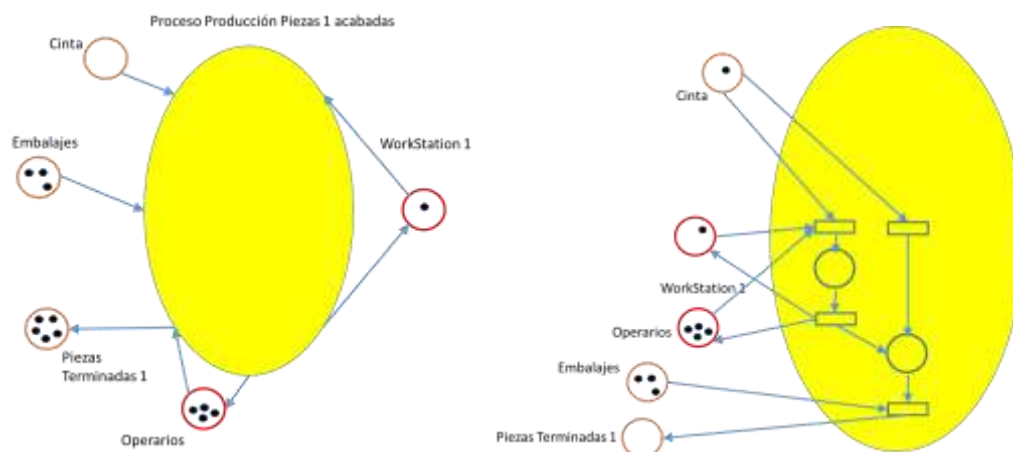


Figura 18. Modelo del proceso de acabado.

5.3.3. Composición del modelo.

- Instanciación: Se ponen en un mismo plano los modelos de los procesos de todas las inyectoras.
- Conexión por fusión de lugares: Se unen los procesos mediante la fusión de lugares, de los recursos que comparten.
- Modelo completo del sistema con recursos y almacenes: Finalmente obtenemos el modelo completo, del proceso de producción de toda la célula CUATRO. Figura 19.

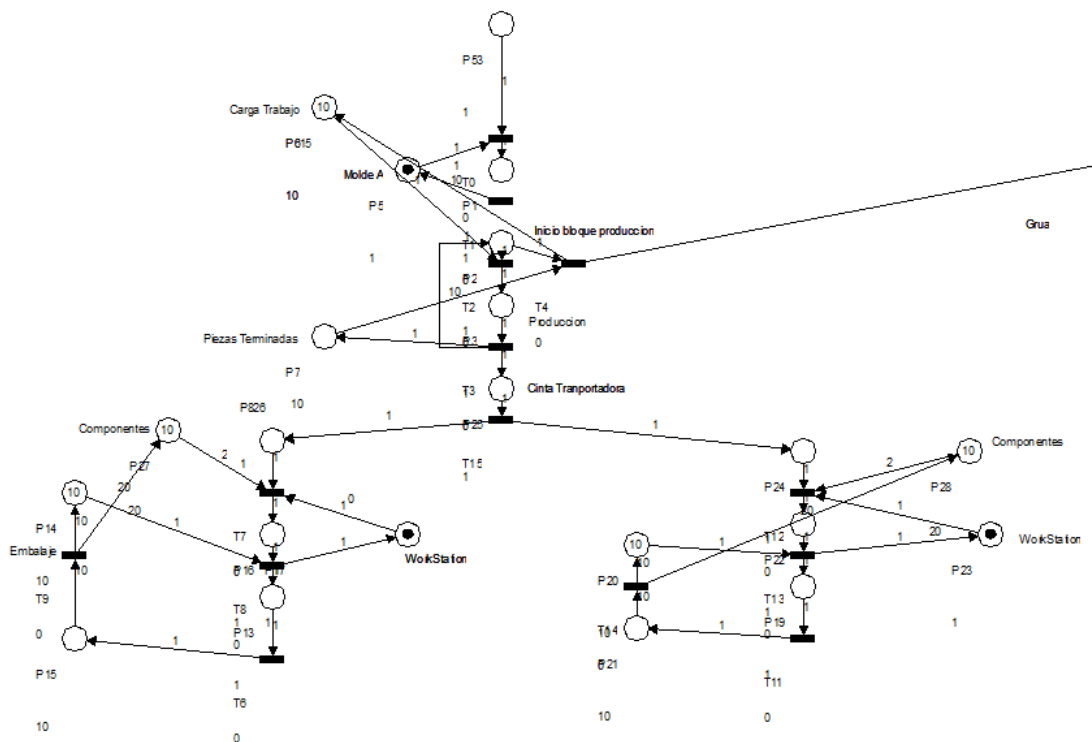


Figura 19. Modelo de la composición del modelo de la I46.

5.4. Resultados

Se ha creado la red de Petri del proceso productivo de toda la célula CUATRO mediante el programa HP SIM, mostrada en la figura 20.

Tal y como se explicó con anterioridad, primero se creó la RdP del proceso productivo de una inyectora, después se crearon el de todas las inyectoras de la Célula CUATRO, y por último se, añadieron los recursos compartidos, así como la fusión de lugares, para conectar toda la red.

Se ha simulado con supuestos donde más de una inyectora trabajaban a la vez, obteniéndose el conflicto de la asignación de recursos y se ha observado cómo se compiten por ellos.

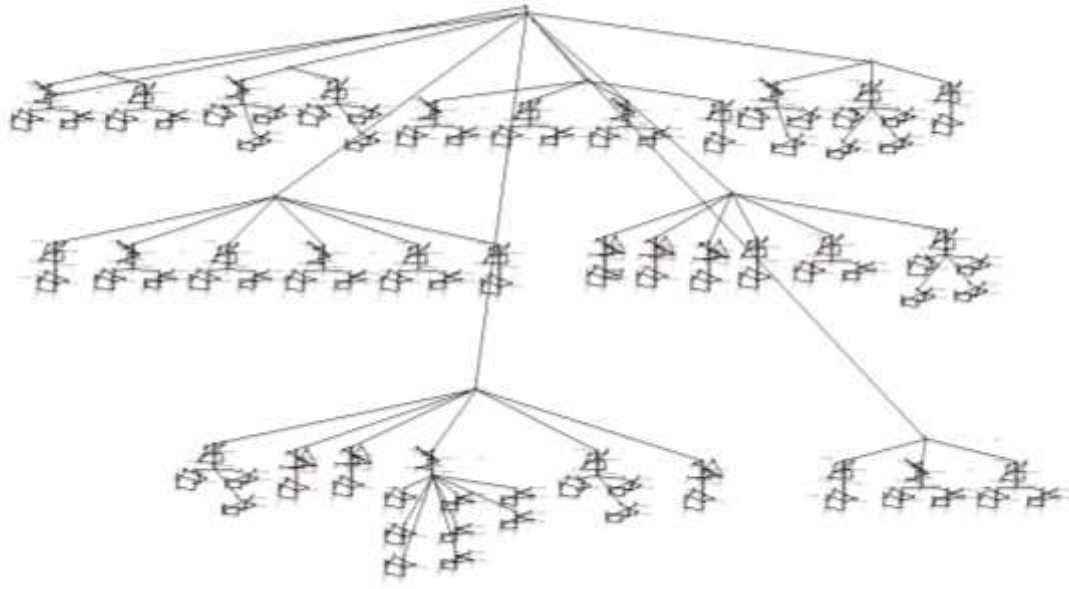


Figura 20. Red de Petri de la célula CUATRO.

Para comprobar que se puede fabricar los lotes deseados, buscaremos en el grafo de alcanzabilidad de la red si ese estado existe.

Se ha creado mediante TINA, como se puede observar en la figura 21, una red de Petri de la inyectora 46, TINA (Time Petri Net Analyzer) es una herramienta para la edición y análisis de redes de Petri.

Debido a la complejidad de la red, que hace que existan una enorme cantidad de estados, hemos simulado que la inyectora 46 tenía una orden de fabricación de 6 piezas para un molde, es decir, se realizan 3 desmoldes.

A continuación, se ha simulado, y buscado el estado donde se fabricaban las piezas deseadas.

Tenía suficientes componentes, operarios, y la grúa y el molde estaban disponibles.

Como era de esperar, se ha obtenido un estado donde las piezas se habían fabricado.

Se puede observar en la figura 22, como en el estado número 1649, se ha obtenido que en los lugares p20 y p16, que corresponden a las piezas fabricadas, hay un total de 3 marcas en cada uno, por lo que es posible fabricar dicho lote.

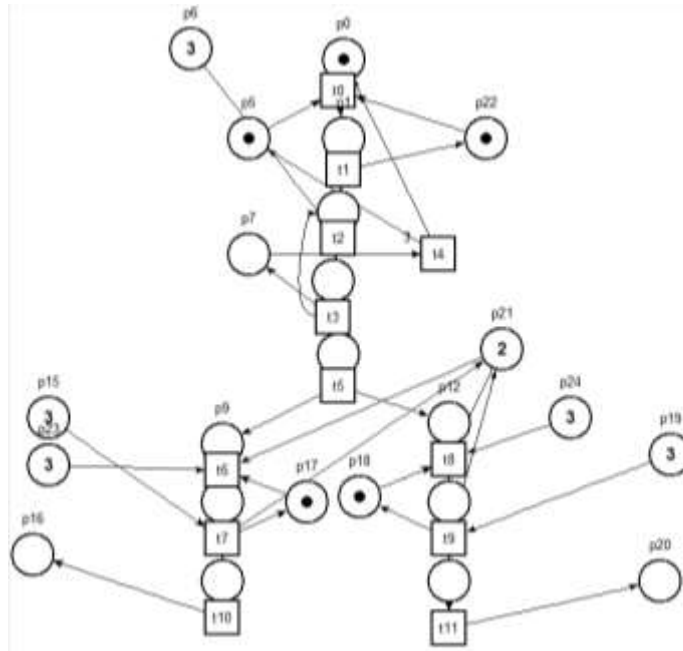


Figura 21. Red de Petri de la I46 realizada por TINA.

C:\Users\lagun\Desktop\buffer.ktz

| digest | places | 24 | transitions | 12 |
|--------|-------------|------|-------------|----|
| | abstraction | | count | |
| help | states | 1650 | | |
| | transitions | 5684 | | |

```

props p10 p15 p16*2 p18 p2*2 p20*3 p21 p22
trans t7/1647

state 1642
props p11*2 p16 p17 p18 p2*2 p20*3 p21*2 p22
trans t10/1647

state 1643
props p1 p14 p16*3 p17 p18 p2 p20*2 p21*2
trans t1/1646 t11/1648

state 1644
props p1 p11 p16*2 p17 p18 p2 p20*3 p21*2
trans t1/1647 t10/1648

state 1645
props p0 p16*3 p17 p18 p2 p20*3 p21*2 p22 p5
trans t0/1648

state 1646
props p14 p16*3 p17 p18 p2*2 p20*2 p21*2 p22
trans t11/1649

state 1647
props p11 p16*2 p17 p18 p2*2 p20*3 p21*2 p22
trans t10/1649

state 1648
props p1 p16*3 p17 p18 p2 p20*3 p21*2
trans t1/1649

state 1649
props p16*3 p17 p18 p2*2 p20*3 p21*2 p22
trans

```

Figura 22. Grafo de alcanzabilidad de la I46.

6. Conclusiones

De este trabajo con las redes de Petri se puede concluir que es una herramienta muy útil a la hora de simular y estudiar el proceso de producción de una empresa, y que nos permite obtener una gran cantidad de información.

Se ha demostrado que mediante redes de Petri podemos obtener una herramienta que cumple con los requerimientos propuestos por CEFA.

7. Líneas futuras

Una vez construido el modelo se pueden realizar ligeros cambios para acercarlo cada vez más al proceso real de fabricación.

En un futuro se desea expandir esta tecnología a toda la fábrica.

Las Redes de Petri nos permiten determinar el conjunto de ejecuciones posibles desde el estado inicial hasta el estado en el que se hayan completado todas las órdenes y poder seleccionar entre todas estas ejecuciones aquella o aquellas que satisfagan determinados criterios globales de la planta como:

- Ejecución de tiempo mínimo de fabricación hasta cumplimiento de la consigna.
- Ejecución que garantice un uso balanceado de las máquinas para garantizar un envejecimiento homogéneo de las mismas.
- Otros criterios.

También:

- Hallar cuellos de botella.
- Automatizar detección de fallos, monitorizando la producción mientras se realiza una simulación de la fabricación correcta.
- ...

Además, como se ha mencionado anteriormente, es una herramienta que tiene un gran número de aplicaciones. Por lo que es una buena vía para seguir trabajando e investigando, creando la posibilidad de abrir puertas a la realización de otros Trabajos de Fin de Grado muy interesantes.

BIBLIOGRAFIA

- [1] "Catedra Cefa" http://www.unizar.es/actualidad/vernoticia_ng.php?id=50316&idh=
- [2] "¿Cómo se desarrolla la automatización de procesos en la industria?"
<https://blog.infaimon.com/fases-y-desarrollo-de-la-automatizacion-de-procesos/>
- [3] "Objetivos y metas de desarrollo sostenible"
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [4] "Ejemplo Lote Económico con Producción y Consumo Simultaneo (POQ)"
<https://www.gestiondeoperaciones.net/inventarios/ejemplo-del-modelo-de-lote-economico-con-produccion-y-consumo-simultaneo-pog/>
- [5] Part-Time Máster en Dirección de Supply Chain (MDSC) "EOQ Model Extensions". Artículo PDF
- [6] "Programación lineal" https://es.wikipedia.org/wiki/Programaci%C3%B3n_lineal
- [7] J.M. Colom; E. Teruel; M. Silva; S. Haddad. Chapter 15 - Structural Methods. Petri Nets for Systems Engineering. A Guide to Modeling, Verification, and Applications. pp. 277 - 316. BerlinSpringer Verlag, 2002. ISBN 3-540-41217-4
- [8] J.M. Colom; M. Silva; E. Teruel. Chapter 5 - Properties. Petri Nets for Systems Engineering. A Guide to Modeling, Verification, and Applications. pp. 53 - 77. BerlinSpringer Verlag, 2002. ISBN 3-540-41217-4
- [9] J.M. Colom. Verificación de propiedades en Redes de Petri. Sistemas Distribuidos: Modelos y Aplicaciones. pp. 99 - 114. Albacete(Spain): Universidad de Castilla-La Mancha, 2001.
- [10] Sara L. Reynoso. Los polímeros plásticos. CREATE SPACE INDEPENDENT PUBLISHING, 2019, España. ISBN: 978-1-79519-208-8
- [11] "Economic Order Quantity" <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/gestion-de-inventarios/cantidad-economica-de-pedidos-eoq/>
- [12] López-Grao, J.P.; Colom, J.M.2013. Structural Methods for the Control of Discrete Event Dynamic Systems–The Case of the Resource Allocation Problem Lecture Notes in Control and Information Sciences. Springer-Verlag London. 433, pp.257-278. ISSN 0170-8643.
- [13] J.M. Colom. 2003. The Resource Allocation Problem in Flexible Manufacturing Systems Lecture Notes in Computer Science. Springer Verlag. 2679, pp.23-35. ISSN 0302-9743.
- [14] M. Silva; E. Teruel; J.M. Colom. 1998. Linear Algebraic and Linear Programming Techniques for the Analysis of Place/Transition Net Systems Lecture Notes in Computer Science. Springer Verlag. 1491, pp.309-373. ISSN 0302-9743.
- [15] J. Ezpeleta; J.M. Colom. 1997. Automatic Synthesis of Colored Petri Nets for the Control of FMS IEEE Transactions on Robotics and Automation. 13-3, pp.327-337. ISSN 1042-296X.
- [16] J. Ezpeleta; J.M. Colom; J. Martínez. 1995. A Petri net based deadlock prevention policy for flexible manufacturing systems IEEE Transactions on Robotics and Automation. 11-2, pp.173-184. ISSN 1042-296X

- [17] J.P. López-Grao; J.M. Colom; F. Tricas. 2014. Chapter 7 - Structural deadlock prevention policies for Flexible Manufacturing Systems. A Petri net outlook Formal Methods in Manufacturing. CRC Press/Taylor and Francis Group. pp.197-228. ISBN 978-1-4665-6155-7
- [18] Jose-Manuel Colom, "Basic concepts of Petri Nets". Artículo PDF
- [19] B. Berthomieu, F. Vernadat, Réseaux de Petri temporels : méthodes d'analyse et vérification avec TINA, Ecole d'été temps réel 2006, Nancy. Traité IC2 "Systèmes temps réel 1 -- techniques de description et de vérification", Ed. Nicolas Navet, Hermes 2006.
- [20] Website of TINA (Time Petri Net Analyzer) - <http://projects.laas.fr/tina/>
- [21] B. Berthomieu, P.-O. Ribet, F. Vernadat, The tool TINA -- Construction of Abstract State Spaces for Petri Nets and Time Petri Nets, International Journal of Production Research, Vol. 42, No 14, July 2004.

8. ANEXO I

El maestro de materiales de la I46, recoge numerosa información sobre las piezas (Material) que fabrica, desde el precio de la materia prima que utiliza, hasta datos del molde, como el ritmo de fabricación de las piezas.

El precio de la materia prima, y las cantidades, se han utilizado para obtener el coste de set-up de cada pieza.

El precio x 1000 se ha utilizado para calcular el coste de holding.

Para el resto de las piezas de toda la célula CUATRO se ha seguido el mismo procedimiento.

| Material | inyectora/Montaje | Descripción | Cliente | N.molde | Pzas/h | Operarios | Cap. Max. Almacen | Precio x 10000 | Combinacion mat prima | Kg (por 1000 piezas) | Piezas/Palet | Precio (€/Kg) |
|----------|-------------------|-----------------------|----------|---------|--------|-----------|-------------------|----------------|-----------------------|----------------------|--------------|---------------|
| 9713891 | 46 | HEATER COVER LH, PIMO | 13478050 | -7882- | 61 | 1 | 1920 | 1,806034483 | 9250510 | 479 | 48 | 1,8 |
| 9713910 | 46 | HEATER COVER RH, PIMO | 13478049 | -7882- | 61 | 1 | 960 | 1,827708333 | 9250510 | 475 | 48 | 1,8 |
| 9714046 | 46 | HEATER COVER RH, PIMT | 13478204 | 8257 | 64 | 1 | 2080 | 1,803104396 | 9250512 | 411 | 52 | 1,8 |
| 9714047 | 46 | HEATER COVER LH, PIMT | 13478203 | 8257 | 64 | 1 | 2080 | 1,803653846 | 9250512 | 417 | 52 | 1,8 |

Tabla 4. Maestro de materiales I46.

| Materia | Demanda (pieza/dia) |
|---------|---------------------|
| 9713891 | 514 |
| 9713910 | 514 |
| 9714046 | 454 |
| 9714047 | 454 |

Tabla 5. Maestro de materiales I46.

| Referencia | Combinacion de materia prima | Cantidad (g) | Materia prima | Cantidad (g) | Porcentaje | Precio (€/Kg) |
|------------|------------------------------|--------------|---------------|--------------|------------|---------------|
| 9713891 | 9250510 | 479 | 9110429 | 287,4 | 60 | 1,8 |
| | | | 9110438 | 191,6 | 40 | 1,8 |
| 9713910 | 9250510 | 475 | 9110429 | 285 | 60 | 1,8 |
| | | | 9110438 | 190 | 40 | 1,8 |
| 9714046 | 9250512 | 411 | 9110435 | 287,7 | 70 | 1,8 |
| | | | 9110445 | 123,3 | 30 | 1,8 |
| 9710447 | 9250512 | 417 | 9110435 | 291,9 | 70 | 1,8 |
| | | | 9110445 | 125,1 | 30 | 1,8 |

Tabla 6. Maestro de materiales I46.

Tabla 7. Maestro de materiales célula CUATRO.

9. ANEXO II

De esta forma se ha obtenido la optimización del coste de producción mediante Solver.

La marca naranja es la función para optimizar.

Las marcas azules son las variables sujetas a restricciones

Las restricciones son las marcas amarillas, excepto las que tienen el texto en rojo, que son piezas que ya no se fabrican en esa inyectora.

Las marcas verdes son las variables que modifica Solver para optimizar la función, en nuestro caso, los lotes a fabricar.

[illegible]

Tabla 8. Calculo Solver I46.

| | | | | | | | |
|---------------|--|--|--|---------------------|--|--|--|
| Excel Solver | | | | Función a optimizar | | | |
| COSTE | | | | 452.200 | | | |
| Restricciones | | | | Cambio | | | |
| Corte Set-Up | | | | 417.200 | | | |
| Corte Holding | | | | 18.000 | | | |
| Máquina 1 | | | | 100 | | | |
| Máquina 2 | | | | 100 | | | |
| Máquina 3 | | | | 100 | | | |
| Máquina 4 | | | | 100 | | | |
| Máquina 5 | | | | 100 | | | |
| Máquina 6 | | | | 100 | | | |
| Máquina 7 | | | | 100 | | | |
| Máquina 8 | | | | 100 | | | |
| Máquina 9 | | | | 100 | | | |
| Máquina 10 | | | | 100 | | | |
| Máquina 11 | | | | 100 | | | |
| Máquina 12 | | | | 100 | | | |
| Máquina 13 | | | | 100 | | | |
| Máquina 14 | | | | 100 | | | |
| Máquina 15 | | | | 100 | | | |
| Máquina 16 | | | | 100 | | | |
| Máquina 17 | | | | 100 | | | |
| Máquina 18 | | | | 100 | | | |
| Máquina 19 | | | | 100 | | | |
| Máquina 20 | | | | 100 | | | |
| Máquina 21 | | | | 100 | | | |
| Máquina 22 | | | | 100 | | | |
| Máquina 23 | | | | 100 | | | |
| Máquina 24 | | | | 100 | | | |
| Máquina 25 | | | | 100 | | | |
| Máquina 26 | | | | 100 | | | |
| Máquina 27 | | | | 100 | | | |
| Máquina 28 | | | | 100 | | | |
| Máquina 29 | | | | 100 | | | |
| Máquina 30 | | | | 100 | | | |
| Máquina 31 | | | | 100 | | | |
| Máquina 32 | | | | 100 | | | |
| Máquina 33 | | | | 100 | | | |
| Máquina 34 | | | | 100 | | | |
| Máquina 35 | | | | 100 | | | |
| Máquina 36 | | | | 100 | | | |
| Máquina 37 | | | | 100 | | | |
| Máquina 38 | | | | 100 | | | |
| Máquina 39 | | | | 100 | | | |
| Máquina 40 | | | | 100 | | | |
| Máquina 41 | | | | 100 | | | |
| Máquina 42 | | | | 100 | | | |
| Máquina 43 | | | | 100 | | | |
| Máquina 44 | | | | 100 | | | |
| Máquina 45 | | | | 100 | | | |
| Máquina 46 | | | | 100 | | | |
| Máquina 47 | | | | 100 | | | |
| Máquina 48 | | | | 100 | | | |
| Máquina 49 | | | | 100 | | | |
| Máquina 50 | | | | 100 | | | |
| Máquina 51 | | | | 100 | | | |
| Máquina 52 | | | | 100 | | | |
| Máquina 53 | | | | 100 | | | |
| Máquina 54 | | | | 100 | | | |
| Máquina 55 | | | | 100 | | | |
| Máquina 56 | | | | 100 | | | |
| Máquina 57 | | | | 100 | | | |
| Máquina 58 | | | | 100 | | | |
| Máquina 59 | | | | 100 | | | |
| Máquina 60 | | | | 100 | | | |
| Máquina 61 | | | | 100 | | | |
| Máquina 62 | | | | 100 | | | |
| Máquina 63 | | | | 100 | | | |
| Máquina 64 | | | | 100 | | | |
| Máquina 65 | | | | 100 | | | |
| Máquina 66 | | | | 100 | | | |
| Máquina 67 | | | | 100 | | | |
| Máquina 68 | | | | 100 | | | |
| Máquina 69 | | | | 100 | | | |
| Máquina 70 | | | | 100 | | | |
| Máquina 71 | | | | 100 | | | |
| Máquina 72 | | | | 100 | | | |
| Máquina 73 | | | | 100 | | | |
| Máquina 74 | | | | 100 | | | |
| Máquina 75 | | | | 100 | | | |
| Máquina 76 | | | | 100 | | | |
| Máquina 77 | | | | 100 | | | |
| Máquina 78 | | | | 100 | | | |
| Máquina 79 | | | | 100 | | | |
| Máquina 80 | | | | 100 | | | |
| Máquina 81 | | | | 100 | | | |
| Máquina 82 | | | | 100 | | | |
| Máquina 83 | | | | 100 | | | |
| Máquina 84 | | | | 100 | | | |
| Máquina 85 | | | | 100 | | | |
| Máquina 86 | | | | 100 | | | |
| Máquina 87 | | | | 100 | | | |
| Máquina 88 | | | | 100 | | | |
| Máquina 89 | | | | 100 | | | |
| Máquina 90 | | | | 100 | | | |
| Máquina 91 | | | | 100 | | | |
| Máquina 92 | | | | 100 | | | |
| Máquina 93 | | | | 100 | | | |
| Máquina 94 | | | | 100 | | | |
| Máquina 95 | | | | 100 | | | |
| Máquina 96 | | | | 100 | | | |
| Máquina 97 | | | | 100 | | | |
| Máquina 98 | | | | 100 | | | |
| Máquina 99 | | | | 100 | | | |
| Máquina 100 | | | | 100 | | | |

Tabla 12. Calculo Solver I31.

| | | | |
|---------------|--|---------------------|--|
| Excel Solver | | Función a optimizar | |
| COSTE | | 452.200 | |
| Restricciones | | Cambio | |
| Corte Set-Up | | 417.200 | |
| Corte Holding | | 18.000 | |
| Máquina 1 | | 100 | |
| Máquina 2 | | 100 | |
| Máquina 3 | | 100 | |
| Máquina 4 | | 100 | |
| Máquina 5 | | 100 | |
| Máquina 6 | | 100 | |
| Máquina 7 | | 100 | |
| Máquina 8 | | 100 | |
| Máquina 9 | | 100 | |
| Máquina 10 | | 100 | |
| Máquina 11 | | 100 | |
| Máquina 12 | | 100 | |
| Máquina 13 | | 100 | |
| Máquina 14 | | 100 | |
| Máquina 15 | | 100 | |
| Máquina 16 | | 100 | |
| Máquina 17 | | 100 | |
| Máquina 18 | | 100 | |
| Máquina 19 | | 100 | |
| Máquina 20 | | 100 | |
| Máquina 21 | | 100 | |
| Máquina 22 | | 100 | |
| Máquina 23 | | 100 | |
| Máquina 24 | | 100 | |
| Máquina 25 | | 100 | |
| Máquina 26 | | 100 | |
| Máquina 27 | | 100 | |
| Máquina 28 | | 100 | |
| Máquina 29 | | 100 | |
| Máquina 30 | | 100 | |
| Máquina 31 | | 100 | |
| Máquina 32 | | 100 | |
| Máquina 33 | | 100 | |
| Máquina 34 | | 100 | |
| Máquina 35 | | 100 | |
| Máquina 36 | | 100 | |
| Máquina 37 | | 100 | |
| Máquina 38 | | 100 | |
| Máquina 39 | | 100 | |
| Máquina 40 | | 100 | |
| Máquina 41 | | 100 | |
| Máquina 42 | | 100 | |
| Máquina 43 | | 100 | |
| Máquina 44 | | 100 | |
| Máquina 45 | | 100 | |
| Máquina 46 | | 100 | |
| Máquina 47 | | 100 | |
| Máquina 48 | | 100 | |
| Máquina 49 | | 100 | |
| Máquina 50 | | 100 | |
| Máquina 51 | | 100 | |
| Máquina 52 | | 100 | |
| Máquina 53 | | 100 | |
| Máquina 54 | | 100 | |
| Máquina 55 | | 100 | |
| Máquina 56 | | 100 | |
| Máquina 57 | | 100 | |
| Máquina 58 | | 100 | |
| Máquina 59 | | 100 | |
| Máquina 60 | | 100 | |
| Máquina 61 | | 100 | |
| Máquina 62 | | 100 | |
| Máquina 63 | | 100 | |
| Máquina 64 | | 100 | |
| Máquina 65 | | 100 | |
| Máquina 66 | | 100 | |
| Máquina 67 | | 100 | |
| Máquina 68 | | 100 | |
| Máquina 69 | | 100 | |
| Máquina 70 | | 100 | |
| Máquina 71 | | 100 | |
| Máquina 72 | | 100 | |
| Máquina 73 | | 100 | |
| Máquina 74 | | 100 | |
| Máquina 75 | | 100 | |
| Máquina 76 | | 100 | |
| Máquina 77 | | 100 | |
| Máquina 78 | | 100 | |
| Máquina 79 | | 100 | |
| Máquina 80 | | 100 | |
| Máquina 81 | | 100 | |
| Máquina 82 | | 100 | |
| Máquina 83 | | 100 | |
| Máquina 84 | | 100 | |
| Máquina 85 | | 100 | |
| Máquina 86 | | 100 | |
| Máquina 87 | | 100 | |
| Máquina 88 | | 100 | |
| Máquina 89 | | 100 | |
| Máquina 90 | | 100 | |
| Máquina 91 | | 100 | |
| Máquina 92 | | 100 | |
| Máquina 93 | | 100 | |
| Máquina 94 | | 100 | |
| Máquina 95 | | 100 | |
| Máquina 96 | | 100 | |
| Máquina 97 | | 100 | |
| Máquina 98 | | 100 | |
| Máquina 99 | | 100 | |
| Máquina 100 | | 100 | |
| Máquina 101 | | 100 | |
| Máquina 102 | | 100 | |
| Máquina 103 | | 100 | |
| Máquina 104 | | 100 | |
| Máquina 105 | | 100 | |
| Máquina 106 | | 100 | |
| Máquina 107 | | 100 | |
| Máquina 108 | | 100 | |
| Máquina 109 | | 100 | |
| Máquina 110 | | 100 | |
| Máquina 111 | | 100 | |
| Máquina 112 | | 100 | |
| Máquina 113 | | 100 | |
| Máquina 114 | | 100 | |
| Máquina 115 | | 100 | |
| Máquina 116 | | 100 | |
| Máquina 117 | | 100 | |
| Máquina 118 | | 100 | |
| Máquina 119 | | 100 | |
| Máquina 120 | | 100 | |
| Máquina 121 | | 100 | |
| Máquina 122 | | 100 | |
| Máquina 123 | | 100 | |
| Máquina 124 | | 100 | |
| Máquina 125 | | 100 | |
| Máquina 126 | | 100 | |
| Máquina 127 | | 100 | |
| Máquina 128 | | 100 | |
| Máquina 129 | | 100 | |
| Máquina 130 | | 100 | |
| Máquina 131 | | 100 | |
| Máquina 132 | | 100 | |
| Máquina 133 | | 100 | |
| Máquina 134 | | 100 | |
| Máquina 135 | | 100 | |
| Máquina 136 | | 100 | |
| Máquina 137 | | 100 | |
| Máquina 138 | | 100 | |
| Máquina 139 | | 100 | |
| Máquina 140 | | 100 | |
| Máquina 141 | | 100 | |
| Máquina 142 | | 100 | |
| Máquina 143 | | 100 | |
| Máquina 144 | | 100 | |
| Máquina 145 | | 100 | |
| Máquina 146 | | 100 | |
| Máquina 147 | | 100 | |
| Máquina 148 | | 100 | |
| Máquina 149 | | 100 | |
| Máquina 150 | | 100 | |
| Máquina 151 | | 100 | |
| Máquina 152 | | 100 | |
| Máquina 153 | | 100 | |
| Máquina 154 | | 100 | |
| Máquina 155 | | 100 | |
| Máquina 156 | | 100 | |
| Máquina 157 | | 100 | |
| Máquina 158 | | 100 | |
| Máquina 159 | | 100 | |
| Máquina 160 | | 100 | |
| Máquina 161 | | 100 | |
| Máquina 162 | | 100 | |
| Máquina 163 | | 100 | |
| Máquina 164 | | 100 | |
| Máquina 165 | | 100 | |
| Máquina 166 | | 100 | |
| Máquina 167 | | 100 | |
| Máquina 168 | | 100 | |
| Máquina 169 | | 100 | |
| Máquina 170 | | 100 | |
| Máquina 171 | | 100 | |
| Máquina 172 | | 100 | |
| Máquina 173 | | 100 | |
| Máquina 174 | | 100 | |
| Máquina 175 | | 100 | |
| Máquina 176 | | 100 | |
| Máquina 177 | | 100 | |
| Máquina 178 | | 100 | |
| Máquina 179 | | 100 | |
| Máquina 180 | | 100 | |
| Máquina 181 | | 100 | |
| Máquina 182 | | 100 | |
| Máquina 183 | | 100 | |
| Máquina 184 | | 100 | |
| Máquina 185 | | 100 | |
| Máquina 186 | | 100 | |
| Máquina 187 | | 100 | |
| Máquina 188 | | 100 | |
| Máquina 189 | | 100 | |
| Máquina 190 | | 100 | |
| Máquina 191 | | 100 | |
| Máquina 192 | | 100 | |
| Máquina 193 | | 100 | |
| Máquina 194 | | 100 | |
| Máquina 195 | | 100 | |
| Máquina 196 | | 100 | |
| Máquina 197 | | 100 | |
| Máquina 198 | | 100 | |
| Máquina 199 | | 100 | |
| Máquina 200 | | 100 | |
| Máquina 201 | | 100 | |
| Máquina 202 | | 100 | |
| Máquina 203 | | 100 | |
| Máquina 204 | | 100 | |
| Máquina 205 | | 100 | |
| Máquina 206 | | 100 | |
| Máquina 207 | | 100 | |
| Máquina 208 | | 100 | |
| Máquina 209 | | 100 | |
| Máquina 210 | | 100 | |
| Máquina 211 | | 100 | |
| Máquina 212 | | 100 | |
| Máquina 213 | | 100 | |
| Máquina 214 | | 100 | |
| Máquina 215 | | 100 | |
| Máquina 216 | | 100 | |
| Máquina 217 | | 100 | |
| Máquina 218 | | 100 | |
| Máquina 219 | | 100 | |
| Máquina 220 | | 100 | |
| Máquina 221 | | 100 | |
| Máquina 222 | | 100 | |
| Máquina 223 | | 100 | |
| Máquina 224 | | 100 | |
| Máquina 225 | | 100 | |
| Máquina 226 | | 100 | |
| Máquina 227 | | 100 | |
| Máquina 228 | | 100 | |
| Máquina 229 | | 100 | |
| Máquina 230 | | 100 | |
| Máquina 231 | | 100 | |
| Máquina 232 | | 100 | |
| Máquina 233 | | 100 | |
| Máquina 234 | | 100 | |
| Máquina 235 | | 100 | |
| Máquina 236 | | 100 | |
| Máquina 237 | | 100 | |
| Máquina 238 | | 100 | |
| Máquina 239 | | 100 | |
| Máquina 240 | | 100 | |
| Máquina 241 | | 100 | |
| Máquina 242 | | 100 | |
| Máquina 243 | | 100 | |
| Máquina 244 | | 100 | |
| Máquina 245 | | 100 | |
| Máquina 246 | | 100 | |
| Máquina 247 | | 100 | |
| Máquina 248 | | 100 | |
| Máquina 249 | | 100 | |
| Máquina 250 | | 100 | |
| Máquina 251 | | 100 | |
| Máquina 252 | | 100 | |
| Máquina 253 | | 100 | |
| Máquina 254 | | 100 | |
| Máquina 255 | | 100 | |
| Máquina 256 | | 100 | |
| Máquina 257 | | 100 | |
| Máquina 258 | | 100 | |
| Máquina 259 | | 100 | |
| Máquina 260 | | 100 | |
| Máquina 261 | | 100 | |
| Máquina 262 | | 100 | |
| Máquina 263 | | 100 | |
| Máquina 264 | | 100 | |
| Máquina 265 | | 100 | |
| Máquina 266 | | 100 | |
| Máquina 267 | | 100 | |
| Máquina 268 | | 100 | |
| Máquina 269 | | 100 | |
| Máquina 270 | | 100 | |
| Máquina 271 | | 100 | |
| Máquina 272 | | 100 | |
| Máquina 273 | | 100 | |
| Máquina 274 | | 100 | |
| Máquina 275 | | 100 | |
| Máquina 276 | | 100 | |
| Máquina 277 | | 100 | |
| Máquina 278 | | 100 | |
| Máquina 279 | | 100 | |
| Máquina 280 | | 100 | |
| Máquina 281 | | 100 | |
| Máquina 282 | | 100 | |
| Máquina 283 | | 100 | |
| Máquina 284 | | 100 | |
| Máquina 285 | | 100 | |
| Máquina 286 | | 100 | |
| Máquina 287 | | 100 | |
| Máquina 288 | | 100 | |
| Máquina 289 | | 100 | |
| Máquina 290 | | 100 | |
| Máquina 291 | | 100 | |
| Máquina 292 | | 100 | |
| Máquina 293 | | 100 | |
| Máquina 294 | | 100 | |
| Máquina 295 | | 100 | |
| Máquina 296 | | 100 | |
| Máquina 297 | | 100 | |
| Máquina 298 | | 100 | |
| Máquina 299 | | 100 | |
| Máquina 300 | | 100 | |
| Máquina 301 | | 100 | |
| Máquina 302 | | 100 | |
| Máquina 303 | | 100 | |
| Máquina 304 | | 100 | |
| Máquina 305 | | 100 | |
| Máquina 306 | | 100 | |
| Máquina 307 | | 100 | |
| Máquina 308 | | 100 | |
| Máquina 309 | | 100 | |
| Máquina 310 | | 100 | |
| Máquina 311 | | 100 | |
| Máquina 312 | | 100 | |
| Máquina 313 | | 100 | |
| Máquina 314 | | 100 | |
| Máquina 315 | | 100 | |
| Máquina 316 | | 100 | |
| Máquina 317 | | 100 | |
| Máquina 318 | | 100 | |
| Máquina 319 | | 100 | |
| Máquina 320 | | 100 | |
| Máquina 321 | | 100 | |
| Máquina 322 | | 100 | |
| Máquina 323 | | 100 | |
| Máquina 324 | | 100 | |
| Máquina 325 | | 100 | |
| Máquina 326 | | 100 | |
| Máquina 327 | | 100 | |
| Máquina 328 | | 100 | |
| Máquina 329 | | 100 | |
| Máquina 330 | | 100 | |
| Máquina 331 | | 100 | |
| Máquina 332 | | 100 | |
| Máquina 333 | | 100 | |
| Máquina 334 | | 100 | |
| Máquina 335 | | 100 | |
| Máquina 336 | | 100 | |
| Máquina 337 | | 100 | |
| Máquina 338 | | 100 | |
| Máquina 339 | | 100 | |
| Máquina 340 | | 100 | |
| Máquina 341 | | 100 | |
| Máquina 342 | | 100 | |
| Máquina 343 | | 100 | |
| Máquina 344 | | 100 | |
| Máquina 345 | | 100 | |
| Máquina 346 | | 100 | |
| Máquina 347 | | 100 | |
| Máquina 348 | | 100 | |
| Máquina 349 | | 100 | |
| Máquina 350 | | 100 | |
| Máquina 351 | | 100 | |
| Máquina 352 | | 100 | |

10. ANEXO III

TINA se ha desarrollado en el OLC y VerTICS, grupos de investigación del LAAS / CNRS.[19][20][21]

Se ha utilizado debido a que es una herramienta gratuita para el ámbito académico.

La caja de herramientas TINA incluye las herramientas:

- **nd (NetDraw)**: Editor y GUI para redes de Petri, Time Petri Nets y Automata.
- **tina**: Construcción de gráficos de alcanzabilidad.
- **sift**: Construcción y verificación de gráficos de alcanzabilidad.
- **struct**: Análisis estructural de redes.
- **plan**: análisis de ruta.
- **selt**: un verificador de modelo LTL de estado / evento.
- **muse**: Un verificador de modelos de mu-cálculo modal.
- **play**: Simulador de pasos.
- **pathto**: buscador de caminos.
- **ndrio**: Herramienta de conversión para redes Time Petri.
- **ktzio**: Herramienta de conversión para sistemas de transición Kripke.
- **frac**: Fiacre al compilador tina tts.

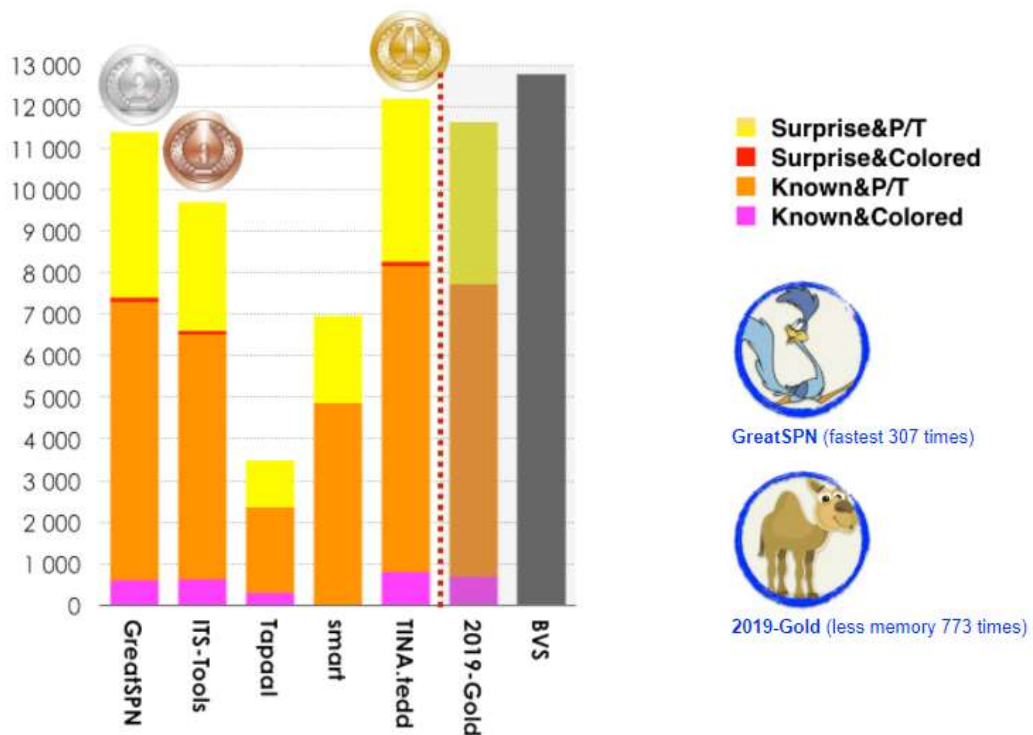


Figura 24. Clasificación Model Checking Contest, en la categoría "StateSpace".